Ю. И. Грибанов



Измерение напряжений в высокоомных цепях



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 429

Ю. И. ГРИБАНОВ

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЫСОКООМНЫХ ЦЕПЯХ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

В брошюре рассматриваются вопросы измерения напряжений с малым потреблением мощности в измерительной цепи. Приводятся практические схемы вольтметров и приставок к осциллографу с очень высоким входным сопротивлением и широким динамическим диапазоном.

Брошюра рассчитана на подготовленных радиолюбителей и работников лабораторий.

6Ф2.08 *Грибанов Юрий Иванович*
Г 82 Измерение напряжений в высокоомных цепях. М. — Л., Госэнергоиздат, 1961.
72 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека, вып. 429).

6Ф2.08

Редактор *А. Г. Соболевский* Техн. редактор *К. П. Воронин*

Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Сдано в набор 5/IX 1961 г. Подписано к печати 23/XII 1961 г.
Т 12368 Бумага $84 \times 108^1/_{32}$ 3,69 печ. л. Уч.-изд. л. 6,2
Тираж 46 000 экз. Цена 25 коп. Заказ 548

Типография Госэнергоиздата Москва, Шлюзовая наб., 10.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Творческая работа радиолюбителя требует наличия хотя бы минимального количества измерительных приборов. Пожалуй, чаще всего радиолюбителю приходится сталкиваться с измерением напряжений, поэтому вольтметр является одним из основных приборов его измерительной лаборатории.

Вольтметры могут быть выполнены в виде электроизмерительных или электронных радиоизмерительных приборов и иметь различные пределы измерения, разную степень универсальности, различаться по точности и рабочему диапазону частот. Но в любом случае вольтметр не должен изменять режим цепи, к которой он присоединяется. Поэтому величина входного сопротивления является важнейшей характеристикой вольтметра, во многом определяющей его возможности. В самом деле:

1. При измерении падения напряжения на некотором сопротивлении R входное сопротивление вольтметра оказывается подключенным параллельно этому сопротивлению Для получения достаточно точного результата входное сопротивление вольтметра должно быть 100 R или больше.

2. При измерении э. д. с. источника происходит деление напряжения между внутренним сопротивлением источника $R_{вн}$ и входным сопротивлением вольтметра. Во избежание погрешности последнее должно быть 100 $R_{вн}$ или больше.

3. При измерениях в радиоцепях входное сопротивление должно быть достаточно велико, чтобы не нарушать работы устройства в процессе измерения. Например, попытка измерения низкоомным вольтметром напряжений в цепях маломощного генератора приведет к срыву колебаний.

В отдельных случаях влияние подключения вольтметра можно учесть расчетом, но это связано с длительными вычислениями.

Всякий электроизмерительный прибор отбирает от цепи, к которой он присоединен, некоторую электрическую энергию, которая преобразуется в нем в механическую, необходимую для перемещения указателя. Величина этого так называемого собственного потребления энергии зависит в основном от системы прибора, его конструкции и от рода измеряемой величины. Что касается вольтметров, то наименьшим собственным потреблением энергии обладают вольтметры электростатической системы, наибольшим — тепловой и электродинамической систем

В соответствии с величинами собственного потребления энергии сопротивления наиболее распространенных показывающих

вольтметров располагаются в области от сотен омов до десятков килоомов на вольт шкалы.

Для измерения напряжений в цепях с радиолампами такие значения сопротивления часто оказываются недостаточными. Поэтому широкое распространение получили ламповые вольтметры — измерительные устройства с предварительным усилением мощности сигнала ламповым усилителем. Ламповые вольтметры имеют входное сопротивление 11—25 *Мом* и позволяют проводить почти все измерения, которые наиболее часто встречаются в практике.

Однако с развитием электроники все чаще встречаются случаи, когда даже подобный ламповый вольтметр не может быть использован для измерений. Многие эксперименты в области физики, химии, биологии и других наук также связаны с измерением напряжений от источников, внутреннее сопротивление которых очень велико. Можно указать на цепи с различными полупроводниками и приборами газового наполнения, на измерения электрохимических потенциалов, биоэлектрических эффектов, электрических зарядов, удельных сопротивлений диэлектриков и многое другое.

При измерениях в таких цепях входное сопротивление вольтметра должно быть порядка 10^8—10^{14} *ом*. И если для измерения напряжений, не превышающих 1 *в*, изготовить измерительное устройство с таким высоким входным сопротивлением не составляет особого труда на базе электрометрической лампы и такие устройства широко описаны [1], то для измерений напряжений в десятки и сотни вольт дело обстоит сложнее. Нужно применять либо специальные схемные решения, либо специальные методы измерений.

Особенности электрических процессов часто делают желательным наблюдение этих процессов на экране осциллографа или запись их самопишущим потенциометром. В этих случаях целесообразно вольтметр конструировать таким образом, чтобы он мог служить и показывающим прибором и приставкой к осциллографу для повышения входного сопротивления усилителя вертикального отклонения.

Частотные характеристики высокоомных цепей редко выходят за пределы звукового диапазона. Однако некоторые электрические явления в этих цепях сопровождаются быстрым нарастанием напряжения — до сотен вольт в микросекунду. Следовательно, вольтметры-приставки к осциллографу должны обладать достаточно широкой полосой пропускания.

Наряду с величиной входного сопротивления весьма важной характеристикой вольтметра является погрешность его показаний. Хотя, вообще говоря, эти характеристики независимы друг от друга, в некоторых случаях они оказывают взаимное влияние и улучшение одной из них достигается за счет другой. Это обстоятельство принимается во внимание в последующем изложении.

Следует указать, что погрешность показания современного лампового вольтметра определяется в основном погрешностями входного делителя и показывающего прибора. Имеется множество

[1] Большей частью они описываются под названием ламповых электрометров. Хотя электрометрами называются устройства для измерения электрических зарядов, в последнее время наблюдается стремление называть электрометрическими все устройства, имеющие очень малый входной ток и применяемые для измерения не только зарядов, но также напряжений и малых токов.

схем, которые позволяют исключить входной делитель По ряду же причин выходные показывающие приборы в ламповых вольтметрах имеют классы точности 1,5—2,5, чем и ограничивается точность лампового вольтметра. Выходной прибор как источник погрешностей исключен в цифровых системах вольтметров, в которых измеряемое напряжение преобразуется в серию импульсов. Число импульсов в серии пропорционально напряжению, и отсчет этого числа производится, например, с помощью декатронов. Обычно величина приведенной погрешности цифровых вольтметров составляет 0,1%. При переходе к цифровой системе регистрации входной каскад высокоомного лампового вольтметра остается без изменений

В настоящей брошюре рассматриваются принципы построения и даются практические советы по изготовлению измерительных приборов с очень высоким входным сопротивлением (до 10^8—10^{14} *ом*) и верхними пределами измерения в сотни вольт. Частотный диапазон некоторых из них достигает нескольких мегагерц. Описываются также приспособления, позволяющие повысить сопротивления имеющихся вольтметров. Приводятся примеры использования вольтметров с высоким входным сопротивлением для измерения различных электрических величин.

Глава первая

ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОКАЗЫВАЮЩИХ ВОЛЬТМЕТРОВ

1. Общие положения

Показывающие вольтметры находят применение и как самостоятельные электроизмерительные приборы и как составная часть комбинированных приборов — ампервольтметров (авометров или тестеров, как их иногда еще называют). Обычно ампервольтметры конструируются и изготавливаются самими радиолюбителями, хотя широко распространены и авометры промышленного изготовления, например типов ТТ-1, Ц-20, Ц-52 и др.

Ценными качествами показывающих вольтметров являются их надежность, простота и независимость от электрической (осветительной) сети. Вместе с тем их собственное потребление энергии довольно велико.

Как правило, показывающий вольтметр состоит из измерителя тока и включенного последовательно с ним добавочного сопротивления (за исключением вольтметров электростатической системы, которые в данной главе не рассматриваются). В качестве измерителей тока обычно используются микро- или миллиамперметры магнитоэлектрической системы. Это объясняется тем, что приборы этой системы принадлежат к числу наиболее точных приборов постоянного тока и, кроме того, по сравнению с другими системами приборов потребляют наименьшую мощность.

Полная мощность, потребляемая вольтметром, включает в себя мощность, необходимую для поворота и удержания рамки измерительного механизма, и мощность, рассеиваемую на добавочном сопротивлении. Если первая для распространенных магнитоэлектрических приборов составляет 10^{-6}—10^{-4} *вт*, то вторая значительно больше и зависит от предела измерения.

Более наглядно и удобно характеризовать вольтметр не потребляемой мощностью, а его сопротивлением. Эти величины связаны соотношением

$$R_{\text{в}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{N}, \qquad (1)$$

где $R_{\text{в}}$ — сопротивление вольтметра, *ом*;

$U_{\text{н}}$ — номинальное напряжение вольтметра, *в*;

N — величина собственного потребления мощности, *вт*.

Сопротивление вольтметра складывается из сопротивления рамки r и добавочного сопротивления $R_д$. Если I_0 — ток полного отклонения указателя измерителя тока, на базе которого изготовлен вольтметр, а $U_н$ — предел измерения вольтметра, то сопротивление вольтметра на данном пределе измерения будет:

$$R_в = R_д + r = \frac{U_н}{I_0}. \qquad (2)$$

Обычно $R_д \gg r$ и, следовательно, $R_в \approx R_д$.

Сопротивление вольтметра на разных пределах измерения различно. Поэтому чтобы характеризовать сопротивление многопредельного вольтметра одним числом, указывают сопротивление, которое имел бы этот вольтметр на пределе измерения, равном 1 *в*. Тогда, чтобы получить сопротивление на каком-либо пределе измерения, нужно только это условное сопротивление умножить на величину предела измерения. Такое условное сопротивление имеет размерность *ом/в* и, как видно из (2), численно равно обратной величине тока полного отклонения указателя.

Поясним это примером. Пусть имеется микроамперметр типа М-24 с током полного отклонения 50 *мка*. На базе этого микроамперметра можно изготовить вольтметр постоянного тока, который будет иметь сопротивление $^1/_{50} \cdot 10^6 = 2 \cdot 10^4$ *ом/в* = 20 *ком/в*.

Предположим, что пределы измерения выбраны 1, 10 и 100 *в*. Тогда сопротивления вольтметра на этих пределах будут соответственно: 20 *ком/в* · 1 *в* = 20 *ком*; 20 *ком/в* · 10 *в* = 200 *ком*; 20 *ком/в* × 100 *в* = 2 *Мом*.

Казалось бы, что для получения вольтметра с очень большим сопротивлением достаточно лишь использовать измеритель тока высокой чувствительности. Однако при конструировании высокоомных показывающих вольтметров встречаются две группы трудностей. Первая из них связана с противоречивостью требований, предъявляемых к измерителю тока, а вторая — с трудностью изготовления стабильных высокоомных добавочных сопротивлений. Остановимся на этих вопросах подробнее.

2. Измерители тока и добавочные сопротивления

Измеритель тока, используемый для изготовления вольтметра, должен не только иметь наружную чувствительность, но и давать малую погрешность, быть прочным и надежным. Все эти качества теснейшим образом связаны с системой крепления подвижной части измерителя.

До недавнего времени подвижные части микро- и миллиамперметров укреплялись исключительно на кернах с подпятниками из твердых материалов, например агата или корунда. При такой системе крепления изготовление высокочувствительных и одновременно высокоточных приборов является весьма сложным делом.

Действительно, противодействующий момент в таких приборах создается пружиной. Для более чувствительного прибора нужна

и более слабая пружина. Однако чем она слабее, тем больше сказываются силы трения в опорах, что является причиной возрастания погрешности показаний.

Для уменьшения сил трения нужно было бы облегчать рамку и уменьшать площадь опоры, т. е. толщину керна. Но это приведет к большой хрупкости измерительного механизма. Он будет чувствительным к перегрузкам и внешним воздействиям, период успокоения его подвижной системы сильно возрастет. Поэтому лабораторные вольтметры высоких классов точности имеют довольно большое собственное потребление и сопротивления порядка 10^2—10^3 *ом/в*.

Для изготовления авометров используются, как правило, так называемые щитовые малогабаритные приборы, например хорошо известный радиолюбителям измеритель тестера типа ИТ, микроамперметры типов М-24, М-494 и др. У этих приборов компромиссные характеристики: при достаточной для технических измерений точности (классы 1—4) они имеют относительно малые токи полного отклонения — порядка 50—500 *мка*. Приборы эти прочны и рассчитаны на работу практически в любых условиях.

В соответствии с собственным потреблением этих приборов авометры промышленного изготовления при измерении постоянных напряжений имеют сопротивления от 5 *ком/в* (у тестера типа ТТ-1) до 20 *ком/в* (у тестера типа Ц-52).

В последние годы приборостроительная промышленность освоила выпуск щитовых малогабаритных микроамперметров, подвижная часть которых укрепляется на растяжках (двух тонких нитях) из материала с большой упругостью, например из фосфористой бронзы, платиносеребряного сплава и т. п. Такая система крепления исключает влияние сил трения и позволяет повысить чувствительность прибора без снижения его точности.

Можно указать, например, на микроамперметр типа М-132, который имеет класс точности 1,5 и выпускается на пределы измерения 0—10, 0—25 *мка* и т. д. Очевидно, что сопротивление вольтметра при таком измерителе может быть доведено до 100 *ком/в*. Можно изготовить вольтметры и с еще более высокими сопротивлениями. Одна из английских приборостроительных фирм, например, серийно выпускает вольтметр типа Scalamp с сопротивлением 1 *Мом/в*. Ток полного отклонения теневой стрелки составляет 1 *мка*, подвижная часть укреплена на растяжках. Вольтметр имеет 10 пределов измерения: от 0,01 до 300 *в*. По данным фирмы погрешность составляет ±1% от верхнего значения соответствующего предела измерения; время успокоения указателя 2 *сек*.

Однако использование измерителей тока большой чувствительности — это не единственный путь для создания высокоомных вольтметров.

Очень высокоомный вольтметр можно изготовить и на базе относительно малочувствительного микро- или даже миллиамперметра. Для этого измеритель соединяют с добавочным сопротивлением через стабильный и линейный усилитель тока, собранный на транзисторах. Если его коэффициент усиления по току K, то измеритель тока вместе с усилителем можно рассматривать как некоторый эквивалентный измеритель, в K раз более чувствительный. Пусть, например, используются миллиамперметр с током полного отклонения 1 *ма* и усилитель с коэффициентом усиления по току 40. При

совместном их включении устройство эквивалентно микроамперметру с током полного отклонения 25 *мка* и вольтметр может иметь сопротивление 40 *ком/в*. Соответствующие усилители будут описаны ниже.

Из сказанного можно сделать вывод, что в настоящее время чувствительность измерителей тока вполне достаточна (или может быть сделана таковой) для изготовления вольтметров постоянного тока, сопротивление которых уже сравнимо с входным сопротивлением стандартного лампового вольтметра, а на высоких пределах измерений даже превосходит его.

Желаемая точность показывающего вольтметра обеспечивается выбором соответствующего измерителя тока и изготовлением достаточно стабильных добавочных сопротивлений. При величинах добавочных сопротивлений в десятки и сотни мегомов самостоятельно изготовить их из манганина или константана нельзя. В этом случае имеются две возможности: собрать добавочные сопротивления из стандартных проволочных сопротивлений или использовать непроволочные, обеспечив их стабильность.

Промышленностью выпускаются негерметизированные с эмалевым покрытием сопротивления МВС из манганинового микропровода в стеклянной изоляции, внешне похожие на сопротивления ВС, и герметизированные сопротивления в керамических корпусах МВСГ. Они выпускаются на номиналы до 10 *Мом* с допустимыми мощностями рассеяния 0,25; 0,5 и 1 *вт*, а по точности — трех классов: 0,1; 0,2 и 0,5. Сопротивления класса 0,1, например, под нагрузкой отклоняются от номинальной величины не более чем на ±0,1%. Точность же подгонки этих сопротивлений к номинальной величине в зависимости от группы, на которые они для этого разбиваются, составляет 0,03—0,2%.

В качестве добавочных сопротивлений можно воспользоваться и высокоомными магазинами сопротивлений МСШ-70. Они также изготовляются из манганинового микропровода и выпускаются в виде декад 10×0,1 и 10×10 *Мом*. Магазин МСШ-72 выпускается в виде декад 10×100 *Мом*.

Однако микропроволочные сопротивления достать трудно и они дороги. Магазины сопротивлений, кроме того, громоздки и тяжелы. Поэтому, как правило, добавочные сопротивления являются непроволочными. По тем же причинам из непроволочных сопротивлений состоят и входные делители ламповых вольтметров.

Непроволочные сопротивления независимо от их типа не обладают такой неизменностью величины во времени, как проволочные. С течением времени они «стареют». Особенно сильное старение сопротивлений происходит в первые месяцы или год после выпуска, и оно является в какой-то мере неизбежным следствием технологии изготовления. Например, при лакировке сопротивлений растворители частично проникают в проводящий слой и в дальнейшем, постепенно испаряясь, меняют его проводимость.

Государственные стандарты на сопротивления ВС (высокостабильные) и МЛТ (металлизированные лакированные термостойкие), например, допускают относительное изменение сопротивления за 6 мес. складского хранения (после изготовления) в пределах ±3% Старение продолжается и в дальнейшем, причем работа сопротивления под нагрузкой ускоряет этот процесс. Отчасти это происходит

из-за повышения температуры сопротивления под нагрузкой, но главным образом потому, что в отдельных местах соприкосновения зерен проводящего слоя могут возникать сильные местные перегревы, которые либо нарушают контакт этих зерен, либо, наоборот, приводят к их спеканию.

По ГОСТ для сопротивлений МЛТ после 2 000 *ч* работы под нагрузкой считается допустимым необратимое изменение активного сопротивления до ±6% сверх отклонения, установленного для данного класса точности. Следовательно, сопротивления класса 1 с допускаемым отклонением от номинала ±5% после 2 000 *ч* работы под нагрузкой могут иметь отклонение ±11%. Реальные цифры обычно гораздо ниже, но приходится считаться и с возможностью предельных отклонений.

Эффект старения у высокомегомных сопротивлений проявляется гораздо заметнее. У сопротивлений КЛМ (композиционные лакированные мегомные) за 6 мес. хранения относительные изменения величины могут достигнуть ±8%.

На величину непроволочных сопротивлений сильно влияют климатические условия — температура, влажность, атмосферное давление.

Практически наиболее заметно воздействие температуры. Для сопротивлений МЛТ в области температур 20—100° С температурный коэффициент может иметь значение в пределах $\pm 0{,}7 \cdot 10^{-3}$ *град*$^{-1}$ для сопротивлений до 1 *Мом* и $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ *град*$^{-1}$ для сопротивлений более 1 *Мом*. Это значит, что при изменении температуры на 10° С (что возможно в течение дня или даже за более короткий срок) изменение величины сопротивления может составлять ±1%.

Температурный коэффициент сопротивлений КЛМ примерно равен $\pm 2 \cdot 10^{-3}$ *град*$^{-1}$.

Температура сопротивления под нагрузкой определяется мощностью, выделяемой током нагрузки, и условиями теплоотдачи. Для вычисления этой температуры имеются соответствующие формулы и графики, которые можно найти в литературе, список которой приведен в конце брошюры.

Воздействие влаги на сопротивления связано с тем, что покрывающая их лаковая пленка разбухает и механически разобщает частицы проводящего слоя, а проникающая сквозь покрытие влага меняет проводимость слоя. Высокоомные сопротивления, имеющие более тонкий проводящий слой, претерпевают при этом большие изменения. Поэтому вместо сопротивлений типа КЛМ желательно использовать сопротивления типа КВМ (композиционные вакуумные мегомные). Они не имеют лакового покрытия, а заключены в стеклянные баллоны, из которых выкачан воздух.

Все сопротивления для повышения временной стабильности нужно подвергать электрической тренировке (выдержке в течение нескольких часов под нагрузкой, чуть большей номинальной) и искусственному старению.

Сопротивления типа КВМ с этой целью выдерживаются 100 *ч* при температуре 100° С, а затем 2—3 недели — в нормальных условиях. При этом величина сопротивления уменьшается на несколько процентов вследствие выделения из проводящей пленки газообразных продуктов.

Сопротивления типа КЛМ тренируют несколькими температурными циклами от —40 до +60° С или выдержкой в течение нескольких недель при температуре 50—70° С.

Тренированные и состаренные сопротивления желательно заключить в герметичную коробку с выводами через проходные изоляторы. В эту же коробку следует поместить осушитель, например силикагель[1]. В упомянутом вольтметре типа Scalamp в герметичную коробку вместе с сопротивлениями помещен и переключатель пределов измерения. По утверждению фирмы-изготовителя, относительные изменения величин добавочных сопротивлений не выходят за пределы нескольких десятых процента за несколько лет.

Такими мерами погрешности, определяемые временной нестабильностью добавочных сопротивлений, можно свести к весьма малой величине.

Измерение высокоомных сопротивлений с достаточной точностью очень затруднительно, а в любительских условиях — просто невозможно. Однако нужную величину сопротивления можно подобрать, и не прибегая к измерениям. Для этого к вольтметру прикладывается номинальное для данного предела напряжение и из нескольких сопротивлений отбирается то, при котором указатель измерителя тока дает отклонение, соответствующее последнему делению шкалы (или возможно близкое к нему). В этом случае сопротивление будет подобрано с погрешностью, равной приведенной погрешности измерителя тока (если пренебречь погрешностью установки номинального напряжения, которое должно контролироваться лабораторным вольтметром).

Тогда наименьшая предельная погрешность δ показаний вольтметра с подобранным таким образом добавочным сопротивлением будет:

$$\delta = \pm\left(\delta_{п} + \delta_R + \frac{1}{U}\,\delta_{п} U_{н}\right)\%, \tag{3}$$

где $\delta_{п}$ — приведенная погрешность измерителя тока, %;

δ_R — относительное изменение величины добавочного сопротивления вследствие старения и воздействия климатических условий, произошедшее после градуировки, %;

$U_{н}$ — номинальное напряжение вольтметра, *в*;

U — показываемое вольтметром напряжение, *в*.

Среди имеющихся сопротивлений может не оказаться достаточно близкого к необходимой величине. Тогда берется ближайшее меньшее сопротивление и последовательно с ним включается такое небольшое постоянное или переменное сопротивление, чтобы их общая величина была равна нужному значению. Стабильность этих регулирующих сопротивлений почти не оказывает влияния на общее сопротивление, поэтому они могут быть любых типов и тренировать их или заключать в герметичную коробку не нужно. Действительно,

[1] Аморфный кремнезем. Представляет собой твердые стекловидные зерна с пористым строением. Выпускается кусковым и гранулированным с диаметром зерен 0,2—7 *мм*. Хороший поглотитель влаги.

относительное изменение всего добавочного сопротивления, вызванное изменением регулирующего сопротивления на $\delta_{пер}\%$, будет:

$$R = \frac{\delta_{пер}}{\frac{R_{пост}}{R_{пер}} + 1}\ \%, \qquad (4)$$

где $R_{пост}$ и $R_{пер}$ — соответственно постоянная и переменная составляющие добавочного сопротивления.

Можно поступить иначе. После того как будет подобрано ближайшее меньшее сопротивление, чувствительность измерителя тока уменьшают настолько, чтобы с данным добавочным сопротивлением при подаче номинального напряжения стрелка измерителя устанавливалась точно на конец шкалы. Это осуществляется с помощью переменного сопротивления, включаемого параллельно измерителю тока. Очевидно, что изменение параллельного сопротивления в этом случае будет влиять на градуировку вольтметра в $\frac{R_{пер} + r}{r}$ раз меньше, чем такие же относительные изменения добавочного сопротивления (r — сопротивление рамки измерителя). Кроме того, рамка имеет сравнительно небольшое сопротивление — сотни или тысячи омов. Величина включаемого параллельно рамке сопротивления будет $R_{пер} = (10 \div 20)\ r$. Поэтому параллельное сопротивление может быть проволочным и, следовательно, стабильным. Тем самым полностью устраняется его влияние на стабильность градуировки. Но при этом сопротивления вольтметров на разных пределах будут несколько различаться.

Микроамперметры при массовом производстве собираются из стандартных деталей. Эти детали — магниты, рамки, пружины и т. п. — не могут быть строго одинаковыми. Поэтому приборы выпускаются всегда с некоторым запасом по чувствительности, а для установки ее номинального значения в приборах предусмотрен элемент регулировки, обычно магнитный шунт.

У некоторых типов приборов регулировать положение шунта можно без вскрытия прибора. У микроамперметров М-24, например, шпилька, на которой укреплен магнитный шунт, выведена через гнездо в задней стенке корпуса. После заводской регулировки гнездо заливается смолой и клеймится. При ввертывании шпильки чувствительность прибора уменьшается, при вывертывании — увеличивается. Практически увеличение чувствительности, достигаемое при полном удалении шунта, составляет 2,5—3%. У отдельных экземпляров приборов конец шпильки проглядывает из-под клейма, т. е. находится примерно вровень с корпусом. Резерва повышения чувствительности у таких приборов нет.

Таким образом, если воспользоваться этой возможностью изменения чувствительности измерителя, то для однопредельных вольтметров можно обойтись без регулирующих сопротивлений и в качестве добавочных использовать сопротивления, по величине несколько бо́льшие номинальных значений. В многопредельных вольтметрах чувствительность регулируют на верхнем пределе измерения. На более низких пределах добавочные сопротивления невелики, их легче измерить и, таким образом, обойтись без переменных сопротивлений.

До сих пор мы имели в виду изготовление возможно более точных вольтметров, погрешность которых определялась бы в основном классом точности используемого измерителя тока. Если же допустимая погрешность устанавливается 5—10% или нет в распоряжении лабораторного вольтметра для градуировки, то пределы измерений просто принимаются равными произведениям тока полного отклонения стрелки прибора на номинальное значение подключенного добавочного сопротивления.

В ряде случаев может помочь то обстоятельство, что относительная погрешность сопротивления уменьшается, если сопротивление образуется последовательным соединением нескольких сопротивлений меньшей величины. В самом деле, точное значение сопротивления есть величина случайная, которая в пределах допуска с равной вероятностью может быть и больше номинального значения и меньше его. При последовательном соединении сопротивлений те отклонения, которые имеют разные знаки, в какой-то мере взаимно погашаются.

В соответствии с теорией вероятностей при последовательном соединении N сопротивлений одного номинала R с допуском $\pm\delta\%$ в 997 случаях из 1 000, т. е. практически всегда, предельная абсолютная погрешность их суммы NR не превысит величины $\pm 0{,}01\delta R\sqrt{N}$, а относительная погрешность—величины $\pm\delta/\sqrt{N}$ %. Это значит, что, например, сумма четырех сопротивлений, каждое из которых имеет номинал R и допуск $\pm 10\%$, эквивалентна одному сопротивлению номинала $4R$ с допуском $\pm 5\%$.

Эти рассуждения справедливы, если сопротивления выбираются наугад, но из большого количества. При этом нужно помнить, что на заводах сортировка и разбраковка производятся таким образом, что в одну коробку могут попасть сопротивления только с одним знаком отклонения от номинала.

При измерении напряжений переменного тока измеритель тока включают через выпрямитель, чаще всего мостового типа, на германиевых или меднозакисных выпрямителях. Для уменьшения влияния характеристик выпрямителей на линейность шкалы и ее неизменность ток через выпрямители должен быть достаточно большим. Поэтому авометры при измерении напряжений переменного тока имеют невысокие сопротивления, порядка 2—7 *ком/в*. Изменения параметров выпрямителей во времени и под действием температуры приводят к возрастанию погрешностей показаний. Так, если класс точности ампервольтомметра Ц-52 по постоянному току 1,5, то по переменному току он равен 2,5, для ампервольтомметра ТТ-2 — соответственно 2,5 и 4.

3. Вольтметры с усилителями тока на транзисторах

Коэффициент усиления по току транзисторного усилителя вольтметра нельзя выбирать слишком большим, потому что дрейф усилителя и нестабильность больших добавочных сопротивлений сведут на нет полученные преимущества. Поэтому наиболее целесообразно сочетание микроамперметра на 50—300 *мка* и усилителя с коэффициентом усиления 20—50. Такое усиление может быть получено от одного каскада с одним транзистором или с двумя транзисторами по балансной схеме.

Как известно, недостатком транзисторов является зависимость их параметров от температуры. Поэтому важно выбрать такую схему, при которой коэффициент усиления либо не зависел бы от изменения температуры, либо допускал корректировку его изменения. То же самое относится и к стабильности нуля усилителя.

На рис. 1 изображена схема вольтметра, в котором используется усилитель тока на одном транзисторе. Несмотря на простоту схемы, вольтметр работает вполне удовлетворительно.

Транзистор может быть любого типа. Нужное значение чувствительности устанавливается при помощи переменного сопротивления $R_ш$.

Перед началом измерений производится калибровка вольтметра. Для этого тумблер $П_3$ устанавливают в левое по схеме положение. Микроамперметр с добавочным сопротивлением $R_д$ образует при этом стрелочный вольтметр, который измеряет напряжение батареи пита-

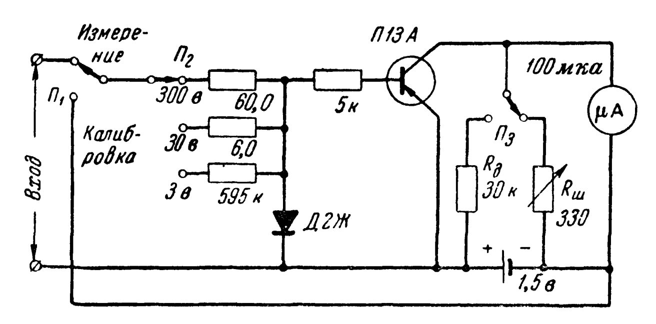


Рис. 1. Схема вольтметра с усилителем на одном транзисторе.

ния. Затем тумблер $П_3$ возвращают в первоначальное положение, переключатель $П_2$ устанавливают в положение для измерения на шкале 3 *в* и тумблер $П_1$ переводят в положение «Калибровка». Теперь на вход вольтметра подается измеренное ранее напряжение батареи и с помощью сопротивления $R_ш$ это значение устанавливают на шкале прибора.

Таким образом, корректируется изменение коэффициента усиления транзистора при изменении температуры и напряжения питающей батареи. Одновременно обеспечивается своевременная сигнализация о необходимости сменить батарею. Диод предохраняет транзистор от повреждения при ошибочной подаче на вход напряжения положительной полярности и, кроме того, позволяет измерять переменное напряжение. Диод может быть любого типа.

При входном напряжении, равном нулю, через микроамперметр протекает часть начального тока коллектора, поэтому шкала вольтметра начинается не с нуля и в начальной части несколько нелинейна. На рис. 2 приведена градуировочная кривая шкалы вольтметра, собранного по схеме на рис. 1.

Более совершенная схема усилителя для вольтметра изображена на рис. 3. Усилитель представляет собой параллельно-балансный каскад на двух транзисторах, включенных по схеме с общим эмиттером. Имеются последовательная (сопротивления R_5 и R_{10}) и парал-

лельная (сопротивления R_3, R_4, R_6, R_8 и R_9) цепи отрицательной обратной связи. Регулировка чувствительности осуществляется при помощи переменного сопротивления R_{11}, т. е. изменением нагрузки.

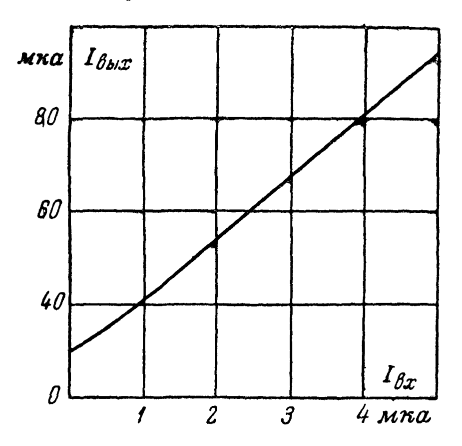


Рис. 2. Градуировочная кривая шкалы вольтметра, собранного по схеме на рис. 1.

Для этой же цели можно включить переменное сопротивление 47 *ком* параллельно входным зажимам усилителя. Последний способ предпочтительнее при сопротивлении микроамперметра свыше 1,5 *ком*.

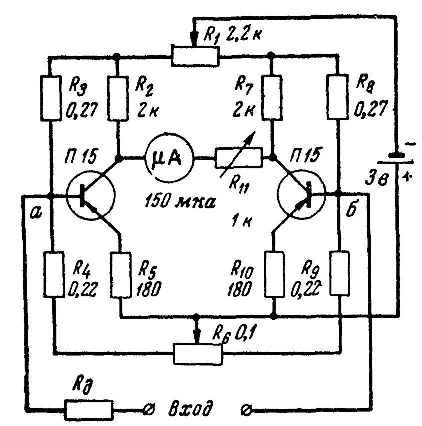


Рис. 3. Вольтметр с параллельно-балансным усилительным каскадом на транзисторах.

Для обеспечения работы транзистора на линейном участке характеристики в цепи его основания должен протекать ток смещения Величину этого тока устанавливают на несколько микроампер больше, чем максимальный ожидаемый ток сигнала. А так как цепь оснований — это одновременно и входная цепь вольтметра, то для исключения влияния токов смещения на работу вольтметра они для обоих транзисторов должны быть строго одинаковыми. Кроме того, в отсутствие сигнала токи коллекторов также должны быть равны (иначе стрелка микроамперметра сойдет с нулевой отметки). Поэтому в отличие от каскада на радиолампах параллельно-балансный каскад на транзисторах имеет два элемента регулировки нуля. С их помощью

устанавливают равенство коллекторных токов при равенстве токов оснований в отсутствие сигнала.

В данной схеме для выравнивания токов оснований служит потенциометр R_6, а для выравнивания коллекторных токов — потенциометр R_1. Регулировка их взаимосвязана, поэтому установка нуля производится следующим образом.

При разомкнутых входных зажимах усилителя (точки *а* и *б* на схеме) стрелку микроамперметра при помощи потенциометра R_6 устанавливают на нулевую отметку шкалы. Затем входные зажимы усилителя замыкаются накоротко и стрелку микроамперметра устанавливают на нулевую отметку потенциометром R_1. Зажимы опять размыкают, и если стрелка смещается с нулевой отметки, то ее возвращают на нуль регулировкой потенциометра R_6. Вновь замыкают зажимы и корректируют положение стрелки потенциометром R_1. Регулировка повторяется в такой последовательности до тех пор, пока стрелка микроамперметра не будет оставаться на нулевой отметке шкалы как при разомкнутых, так и при замкнутых входных зажимах усилителя.

Величину добавочного сопротивления вольтметра $R_д$ определяют обычным порядком.

Экспериментальный образец усилителя, собранный по схеме на рис. 3 с произвольно выбранной парой транзисторов, имел следующие характеристики. Коэффициент усиления по току 30, шкала линейна. При изменении температуры от 15 до 30° С изменения коэффициента усиления не наблюдалось, при изменении температуры от —20 до +40° С коэффициент усиления менялся на 15%. При изменении напряжения питания от 1,5 до 6,2 *в* изменение коэффициента усиления составляло в среднем 3,2% на 1 *в*. Дрейф нуля после трехминутного «прогрева» составлял в пересчете на вход около 0,05 *мка* за час.

Иногда требуется, чтобы вольтметр имел нуль посредине шкалы. Для этого сопротивление R_3 составляют из двух сопротивлений и величина одного из них подбирается с таким расчетом, чтобы при замыкании его накоротко стрелка прибора отклонялась ровно на полшкалы. Тумблер для замыкания сопротивления укрепляют на передней панели, а на шкалу наносят дополнительные отметки.

Применение балансных каскадов является очень эффективным средством уменьшения дрейфа «нуля», но чтобы полностью использовать преимущества балансного каскада, нужно подобрать транзисторы с возможно более близкими параметрами. Для этого у нескольких экземпляров транзисторов снимают зависимости токов коллекторов от токов оснований и отбирают пары, у которых эти зависимости наиболее близки.

Но и у отобранных таким образом транзисторов при изменении температуры коллекторные токи могут меняться по-разному. Больше всего изменяется с температурой начальный ток коллектора $I_{к0}$— ток, который протекает в цепи коллектора при нулевом токе эмиттера, т. е. при разомкнутой эмиттерной цепи. У германиевых плоскостных транзисторов ток $I_{к0}$ меняется в среднем в 2 раза на каждые 10—11° С перепада температур и нестабильность $I_{к0}$ является основной причиной нестабильности «нуля» транзисторных усилителей постоянного тока. Поэтому из отобранных пар транзисторов дополнительно отбирается пара транзисторов с близкими температурными характеристиками токов $I_{к0}$. Для этого надо замерить величину на-

чального коллекторного тока $I_{к0}$ при двух температурах, близких к началу и концу рабочего диапазона температур, например +20 и +40° С. Окончательно отбирается та пара транзисторов, у которой температурные изменения начальных коллекторных токов примерно равны.

Особое внимание подбору транзисторов должно быть уделено при построении усилителей с большим коэффициентом усиления, например для милливольтметров.

В однокаскадном усилителе при невысоком коэффициенте усиления и наличии отрицательных обратных связей могут с успехом использоваться транзисторы с параметрами, различающимися на 20—40%. Неудобство будет заключаться только в необходимости часто подстраивать нуль при помощи двух ручек управления, тогда как при подобранных транзисторах установка нуля потребуется лишь однажды, при первоначальной наладке.

Помимо подбора транзисторов по температурным характеристикам, для уменьшения влияния температуры принимают меры конструктивного характера. Транзисторы помещают в медную герметически закрытую коробку с толщиной стенок 2—4 *мм*. Коробку термоизолируют, например асбестом, и помещают в другую коробку. Получается своеобразный термостат. Из-за большой теплоемкости системы изменение внешней температуры окажет на транзисторы малое влияние. В коробку помещают только транзисторы.

Большое значение имеет величина напряжения эмиттер — коллектор транзисторов. «Шум» транзистора будет наименьшим, а стабильность — наибольшей, если значение этого напряжения лежит в пределах 0,7—0,9 *в*.

При изготовлении вольтметров на базе малочувствительных измерителей тока, а также милливольтметров, указателей равновесия для компенсационных схем и т. п. могут потребоваться усилители с коэффициентом усиления до 1 000. Обычно они выполняются в виде двух последовательно включенных балансных каскадов. Транзисторы для них должны отбираться с особой тщательностью.

На рис. 4 показана схема одного из таких усилителей на транзисторах П5Д или П403. Интересной особенностью этой схемы является стабилизация напряжений эмиттер — коллектор транзисторов первого каскада. С помощью дополнительного каскада усиления на транзисторе T_5 в цепи отрицательной обратной связи эти напряжения поддерживаются равными падениям напряжений на сопротивлениях R_9 и R_{10}, поскольку напряжениями эмиттер — основание транзисторов T_3, T_4 и T_5 можно пренебречь ввиду их малости.

Рассмотрим действие обратной связи при работе только каких-либо одних половин балансных каскадов усилителя, например транзисторов T_2 и T_3. Пусть коллекторный ток транзистора T_2 возрастет вследствие, например, повышения температуры. Падение напряжения на сопротивлении R_3 при этом увеличится, а напряжение эмиттер — основание транзистора T_3 (эмиттерного повторителя) уменьшится. Тем самым уменьшится падение напряжения на сопротивлениях R_9 и R_{11} нагрузки эмиттерного повторителя T_3. Так как $R_{11} \gg R_9$, то практически весь сигнал выделится на сопротивлении R_{11}. Заметим, что для этого напряжение батареи питания выбирается довольно высоким; в данном усилителе оно составляет 13,5 *в*.

При уменьшении падения напряжения на R_{11} увеличивается напряжение эмиттер — основание транзистора T_5 Эти ведет к увеличению его коллекторного тока и увеличению падения напряжения на сопротивлении R_8, а последнее в свою очередь — к уменьшению напряжения эмиттер — основание транзистора T_2 и, следовательно, к уменьшению его коллекторного тока (приблизительно до первоначальной величины).

Когда работают обе половины балансных каскадов, указанная цепь отрицательной обратной связи подавляет температурные изменения коллекторных токов, но не влияет на коэффициент усиления Действительно, при изменении температуры коллекторные токи

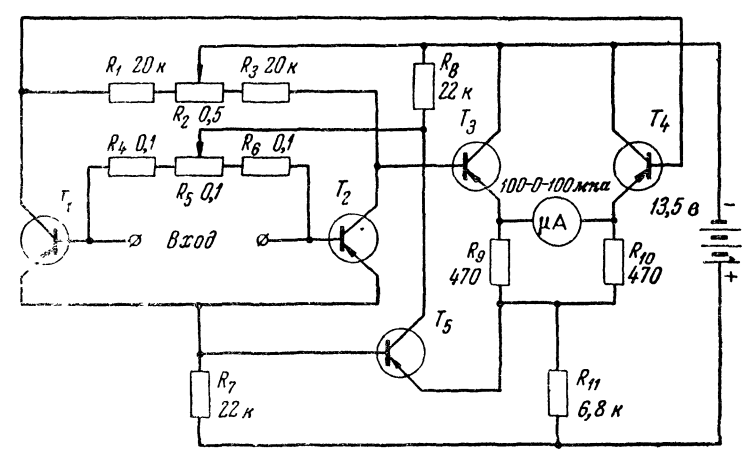


Рис. 4. Двухкаскадный усилитель на транзисторах для милливольтметра.

транзисторов T_1 и T_2 либо одновременно возрастают, либо одновременно уменьшаются, в связи с чем на сопротивлении R_7 появляется некоторое падение напряжения Токи же полезного сигнала протекают по сопротивлению R_7 в противофазе и никакого падения напряжения на нем не создают.

Температурный эффект самого транзистора T_5 также способствует температурной стабилизации схемы. В самом деле, при повышении температуры коллекторный ток транзистора T_5 и создаваемое этим током падение напряжения на сопротивлении R_8 увеличиваются, противодействуя увеличению коллекторных токов транзисторов T_1 и T_2.

Чувствительность рассматриваемого усилителя ограничивается в основном низкочастотными шумами транзисторов С указанными выше типами транзисторов кратковременную нестабильность нуля можно снизить до 0,001 *мка* (в пересчете на вход). При этом напряжения эмиттер — коллектор транзисторов T_1 и T_2, т. е. падения напряжений на сопротивлениях R_9 и R_{10}, должны поддерживаться равными 0,9 *в*. Уход «нуля» при изменении температуры от 20 до 40° С имеет порядок 0,005 *мка*.

Указанный усилитель с микроамперметром на 100 *мка* эквивалентен микроамперметру на 0,1 *мка*, причем максимальная погрешность за счет дрейфа «нуля» составляет 5%.

На выходе описываемого усилителя может быть включен и гораздо более грубый показывающий прибор с током полного отклонения до 1,5 *ма*. В этом случае погрешность, обусловленная дрейфом, становится совершенно незаметной и вольтметр может быть изготовлен не только высокоомным, но и очень точным.

Для измерений переменных напряжений в звуковом диапазоне частот во всех рассмотренных усилителях показывающий прибор подключают через мостиковый выпрямитель, собранный на полупроводниковых диодах. Для более высоких частот изготавливают выносной пробник с полупроводниковым диодом, подобный высокочастотному пробнику лампового вольтметра.

Глава вторая

ВХОДНАЯ ЦЕПЬ ЛАМПОВОГО ВОЛЬТМЕТРА

4. Входные делители

Универсальные ламповые вольтметры предназначены для измерения напряжений от десятых долей вольта до сотен вольт. Для получения линейной шкалы изменение напряжения на управляющей сетке входной лампы вольтметра должно быть небольшим. Поэтому ламповые вольтметры изготавливаются многопредельными. Они имеют одну основную шкалу на 0,5—3 *в*, а расширение пределов измерения осуществляется обычно при помощи входных делителей напряжения.

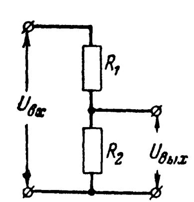


Рис. 5. Делитель напряжения.

Входный делитель должен быть как можно более высокоомным. Однако возможности повышения его величины ограничиваются, во-первых, погрешностями показаний вольтметра, появляющихся вследствие временной нестабильности непроволочных сопротивлений делителя, во-вторых, трудностью измерения больших сопротивлений, в-третьих, эффектами, связанными с протеканием через делитель сеточного тока лампы.

На рис. 5 изображен делитель напряжения, состоящий из двух сопротивлений. Его номинальный коэффициент деления

$$K = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

На практике сопротивления делителя неизбежно будут иметь некоторые отклонения от номинальных значений. В худшем случае знаки отклонений обоих сопротивлений будут различны и относительная погрешность коэффициента деления

$$\delta_к = \frac{\Delta K}{K} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}(\delta_1 + \delta_2), \quad (5)$$

где $\delta_к$ — относительная погрешность коэффициента деления делителя;

$\delta_1 = \frac{\Delta R_1}{R_1}$ и $\delta_2 = \frac{\Delta R_2}{R_2}$ — относительные погрешности первого и второго сопротивлений плеч делителя.

На больших пределах измерения, когда $R_2 \ll R_1$, $\delta_к \approx \delta_1 + \delta_2$.

Очевидно, что и погрешность показаний лампового вольтметра из-за неточности делителя будет равна $\delta_к$.

В промышленных ламповых вольтметрах сопротивления делителя подбираются обычно с точностью $\pm 0,5\%$.

О степени влияния внешних условий можно судить по вольтметру типа А4-М2. Его максимально допустимая дополнительная температурная погрешность в рабочем диапазоне температур от —40 до $+50^\circ$ С установлена в $\pm 6\%$ верхнего значения шкалы, а дополнительная погрешность при влажности 95—98% также установлена в $+6\%$ В основном это погрешности делителя

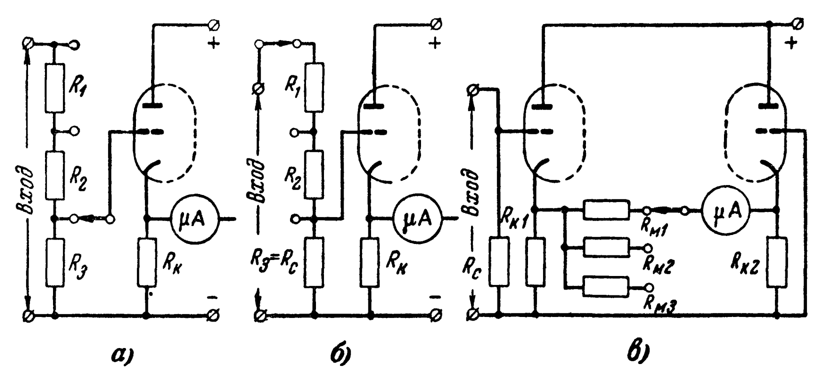


Рис. 6. Схемы переключения пределов измерения в ламповых вольтметрах. *а* и *б* — на входе; *в* — на выходе.

Входный делитель (или часть его) одновременно является сопротивлением утечки сетки лампы. Сеточный ток создает на нем некоторое падение напряжения, которое составляет часть сеточного смещения.

Таким образом, сеточный ток лампы может оказывать непосредственное влияние на работу вольтметра. Помимо прочего, степень этого влияния зависит и от выбора схемы делителя.

Наиболее распространена схема делителя показана на рис. 6,*а*. Входное сопротивление вольтметра с таким делителем (не принимая во внимание сеточный ток) постоянно на всех пределах измерения. Что же касается сопротивления утечки сетки, то на низшем пределе измерения оно равно полному сопротивлению делителя и при переходе на более высокие пределы уменьшается. В соответствии с этим доля погрешности измерений, обусловленная влиянием сеточного тока, также максимальна на низшем пределе измерения и резко уменьшается на более высоких пределах. Обычная величина полного сопротивления делителя такого вида составляет 11—25 *Мом.*

При использовании делителя, показанного на рис. 6,*б*, погрешность от влияния сеточного тока может быть сделана малой и на низшем пределе измерения С этой целью сопротивление $R_с$ выбирают сравнительно небольшим, не выше 5 *Мом*, чтобы создаваемое на нем сеточным током падение напряжения было незначительным Входное сопротивление такого делителя увеличивается с увеличением предела измерения, оставлять постоянным по отношению к 1 *в* шкалы (в омах на вольт). Величина его, помимо условий стабильности сопротивлений, определяется чувствительностью лампового устройства, с помощью которого измеряется падение напряжения на сопротивлении $R_с$.

Этим устройством преимущественно является балансный катодный повторитель, между катодами ламп которого включен микроамперметр с последовательным сопротивлением для регулировки чувствительности вольтметра. При подаче на сетку одной из ламп напряжения $U_{вх}$ ток через микроамперметр определяется выражением

$$I_м = \frac{SU_{вх}}{2 + \frac{R_м}{R_к} + \frac{R_м}{R_i}(1 + \mu)} \ [ма], \qquad (6)$$

где S — крутизна лампы, *ма/в*;

$R_м$ — сопротивление между катодами ламп, включая стрелочный прибор, *ком*;

$R_к$ — сопротивление в цепи катода, *ком*;

R_i — внутреннее сопротивление лампы, *ком*.

Если, например, ток полного отклонения стрелочного прибора 200 *мка*, а $R_к = 100$ *ком* и $R_м = 1$ *ком*, то для вольтметра на лампе 6Н1П получим наименьший предел измерения равным 0,25 *в*. При $R_с = 5$ *Мом* это обеспечивает величину входного сопротивления 20 *Мом/в*.

К сожалению, реальная чувствительность ограничивается нестабильностью нулевого положения указателя вольтметра — дрейфом «нуля». Величина дрейфа связана с постоянством питающих напряжений, типом и подбором ламп, изменением параметров ламп со временем. Поэтому основной предел измерения принимается равным 1—5 *в*, в связи с чем входное сопротивление вольтметра с делителем, показанным на рис. 6,*б*, может составлять лишь 1—5 *Мом/в*.

Из формулы (6) явствует, что пределы измерения можно изменять при помощи изменения величины сопротивления $R_м$. Соответствующая схема показана на рис. 6,*в*. Преимущество этого способа заключается в том, что становится ненужным входной высокоомный делитель со всеми трудностями его изготовления, а делитель на выходе, будучи относительно низкоомным, может быть собран из стабильных проволочных сопротивлений. Естественно, что точность показаний вольтметра при этом будет выше.

По такой схеме конструируются вольтметры, которые предназначены для измерения напряжений не свыше 150 *в*, например ВЛУ-2. При необходимости иметь и более высокие пределы измерения на входе вольтметра устанавливают делитель из двух сопротивлений с коэффициентом деления, например, 1 : 10. Так сделано у вольтметра А4-М2, у которого деление сигнала на входе происходит при измерениях на шкалах 300 и 1 000 *в*. На этих шкалах

к основной погрешности добавляется еще составляющая, обусловленная погрешностью входного делителя и равная 1% измеряемого напряжения.

Сопротивление утечки сетки $R_с$ обычно равно 20—40 *Мом.*

Эквивалентная схема входной цепи лампового вольтметра постоянного тока изображена на рис. 7,*а*. Здесь U — измеряемое напряжение; $R_{вн}$ — выходное сопротивление измеряемой цепи относительно точек присоединения вольтметра; $R_с$ — сопротивление утечки сетки, которое может быть и частью входного делителя.

Для облегчения анализа входную цепь можно изобразить и в виде схем, представленных на рис. 7,*б* и *в*.

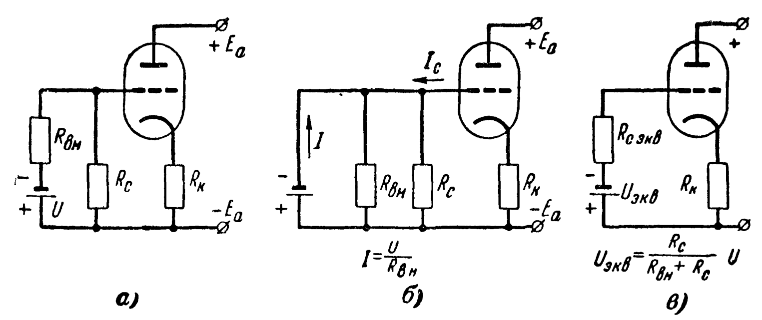


Рис. 7. Эквивалентные схемы входной цепи лампового вольтметра с присоединенным источником.

а — начальная схема; *б* — с эквивалентным источником тока; *в* — с эквивалентным источником напряжения.

В схеме на рис. 7,*б* источник напряжения U с последовательно включенным внутренним сопротивлением $R_{вн}$ заменен эквивалентным источником тока I с параллельно включенным внутренним сопротивлением $R_{вн}$. В этом случае по эквивалентному сопротивлению утечки сетки $R_{с.экв}=\dfrac{R_{вн}R_с}{R_{вн}+R_с}$ протекает сумма токов сигнала I и сетки $I_с$.

К схеме, изображенной на рис. 7,*в*, можно перейти, воспользовавшись известной теоремой об эквивалентном генераторе или же заменив источник тока в схеме на рис. 7,*б* эквивалентным источником напряжения. По сопротивлению $R_{с.экв}$ при этом протекает лишь сеточный ток лампы, а результат протекания во входной цепи тока сигнала учтен соответствующим уменьшением значения напряжения $U_{экв}$ против значения U.

5. Влияние сеточного тока

Некоторая доля тока сетки первой лампы вольтметра (а при некоторых условиях весь ток сетки) протекает в цепи источника измеряемого напряжения. Поэтому и входное сопротивление посто-

янному току и дифференциальное входное сопротивление (сопротивление переменному току) вольтметра в значительной мере определяются сеточным током.

Сеточный ток является также источником погрешности показаний. Погрешности возникают вследствие смещения нуля вольтметра при подключении последнего к источнику измеряемой э. д. с, нелинейного характера зависимости сеточного тока от напряжения на сетке лампы (от измеряемого напряжения) и от изменения величины сеточного тока в зависимости от окружающих условий и времени («дрейфа» сеточного тока).

Когда вольтметр подключают к измеряемой цепи, величина сопротивления утечки лампы резко уменьшается из-за присоединения

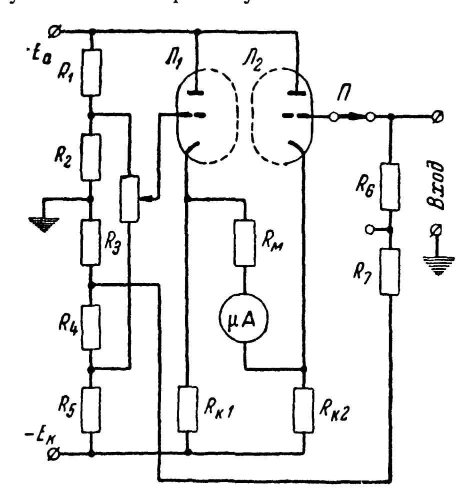


Рис. 8. Схема компенсации влияния начального сеточного тока в вольтметре А4-М2.

сопротивления $R_{вн}$, что видно из схем на рис. 7,*б* и *в*. В связи с этим происходит смещение указателя вольтметра с нулевой отметки на величину $I_с(R_с—R_{с\ экв})$. Если $R_{вн}\approx 0$, то смещение нуля составляет $I_сR_с$ и для вольтметров на обычных двойных триодах при сопротивлении делителя 10—20 *Мом* достигает значения 0,1—0,2 *в*.

В промышленных вольтметрах с чувствительной основной шкалой принимают специальные меры для устранения указанного влияния начального сеточного тока. Для примера на рис 8 показана упрощенная схема лампового вольтметра А4-М2 На сетку правой половины лампы 6Н1П с сопротивления R_3 через входной делитель поступает небольшое отрицательное напряжение порядка 0,15 *в* Оно примерно равно падению напряжения, создаваемому сеточным током лампы на полном сопротивлении делителя Если теперь сетку лампы замкнуть на «землю» (непосредственно или через внутреннее сопротивление источника измеряемой э. д. с), то указатель не сместится с нулевой отметки, потому что одновременно замы-

каются как делитель, так и сопротивление R_3 Небольшая разница в падениях напряжений на делителе и сопротивлении R_3 значения не имеет.

Погрешность из-за смещения «нуля» можно устранить, если исключить сопротивление R_c. Роль сопротивления утечки сетки будет в этом случае выполнять внутреннее сопротивление источника измеряемой э. д. с. Но при этом должна иметься возможность установки нуля вольтметра без отключения последнего от измеряемой цепи.

Погрешности показаний вольтметров из-за протекания во входной цепи сеточного тока определяются почти полностью указанным смещением нуля. Но, помимо измерения напряжений, высокоомные

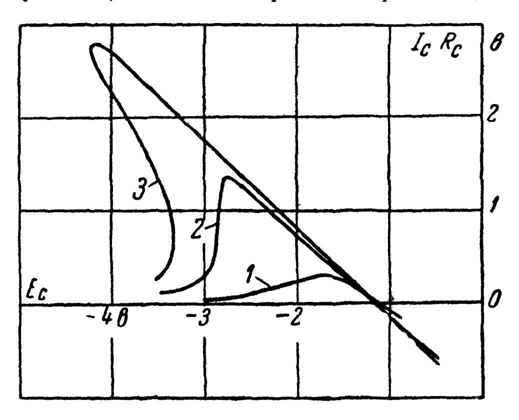


Рис. 9. Влияние сопротивления R_c на величину смещения сетки.
$1 - R_c = 10^8$ *ом*; $2 - R_c = 5 \cdot 10^8$ *ом*; $3 - R_c = 2 \cdot 10^9$ *ом*. Лампа 6Н2П; $E_a = 200$ *в*.

вольтметры могут использоваться и для измерения малых токов по падению напряжения, которое создается этими токами на большом сопротивлении R_c в цепи сетки. В этих случаях нуль шкалы вольтметра может быть установлен с учетом падения напряжения $I_c R_c$, создаваемого током сетки на сопротивлении R_c, и при подключении источника тока с высоким внутренним сопротивлением положение нуля вольтметра останется неизменным. Погрешность показаний при этом будет определяться главным образом зависимостью величины сеточного тока от напряжения на сетке лампы. Нелинейный характер этой зависимости может при достаточно большой величине сопротивления R_c вообще привести к нестабильной работе устройства.

Для примера на рис. 9 показаны зависимости падения напряжения $I_c R_c$ от напряжения на сетке лампы (включая смещение) для трех значений сопротивления R_c. Видно, что при $R_c > 5 \cdot 10^8$ *ом* и $U_c < -3$ *в* ламповый каскад нормально работать не сможет, потому что зависимость между напряжением на сетке и сеточным током становится неоднозначной.

Из-за непостоянства сеточного тока во времени учитывать его при градуировке вольтметра нельзя, так как спустя некоторое время такая градуировка стала бы неверной.

Решительной мерой, снижающей влияние сеточного тока, является уменьшение самого сеточного тока. Вместе с тем осуществление этой меры связано с трудностями, тем бо́льшими, чем меньший ток сетки мы желаем получить. Отметим также, что в отдельных случаях можно удовлетворительно работать и при довольно значительных токах сетки. Поэтому сеточный ток лампы (а, точнее, входной ток измерительного устройства) должен быть снижен лишь настолько, чтобы вызываемая им погрешность измерения не превышала заданного значения.

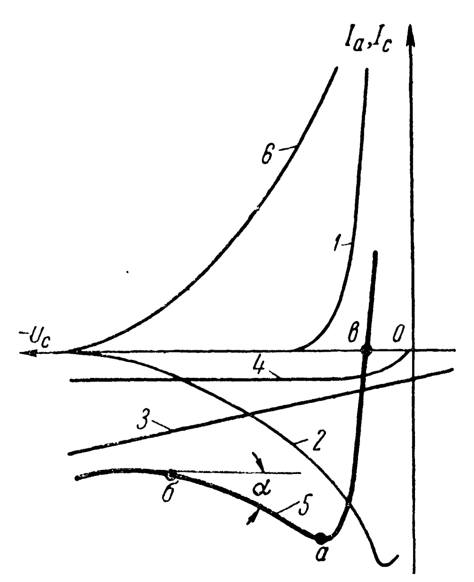


Рис. 10. Сеточный ток лампы и основные его составляющие.

1 — электронный ток сетки; *2* — ионный ток сетки; *3* — токи утечки по изоляции сетки; *4* — термоэлектронный ток сетки; *5* — результирующий ток сетки; *6* — анодный ток лампы.

Для успешного решения подобных задач требуются знания природы сеточного тока, причин его возникновения и степени его влияния на результат измерений.

Подробный анализ первых двух вопросов можно найти в литературе, список которой приведен в конце книги. Здесь же будут даны лишь самые необходимые сведения о сеточном токе и рассмотрен расчет катодного повторителя с учетом влияния сеточного тока.

Общий сеточный ток лампы является суммой многих составляющих. В обычных приемно-усилительных радиолампах основное значение имеют следующие четыре из них (рис. 10):

1. Электронный ток сетки, возникающий вследствие того, что некоторая часть электронов вылетает с катода с достаточными скоростями, чтобы преодолеть тормозящее поле сетки и попасть на

нее. Для электронной составляющей сетка играет роль анода, поэтому этот ток подчиняется тем же закономерностям, что и анодный ток диода.

С увеличением отрицательного напряжения на сетке электронный ток сетки быстро уменьшается и при $U_{\text{с}} = -(2 \div 3)$ *в* полностью прекращается. При прочих равных условиях электронный ток сетки увеличивается при снижении анодного напряжения.

Поскольку электронный ток сетки аналогично анодному току направлен к катоду, он считается положительным. Все остальные составляющие образуют отрицательный сеточный ток.

2. Ионный ток сетки, появляющийся за счет ионизации молекул остаточных газов в лампе. В обычных режимах работы ламп — это основная составляющая сеточного тока, намного превосходящая все остальные.

Для каждого типа радиолампы отношение ионного тока сетки к анодному току при неизменном анодном напряжении постоянно. Это напряжение определяется только давлением остатков воздуха в колбе.

При понижении анодного напряжения ионный ток уменьшается и при $U_{\text{а}} < 7{,}9$ *в* полностью прекращается. Объясняется это тем, что при этом летящие к аноду электроны имеют уже недостаточную энергию, чтобы ионизировать или хотя бы возбудить атомы даже кислорода, который из всех присутствующих в лампе газов имеет наименьшие потенциалы ионизации и возбуждения.

3. Ток утечки сетки, обусловленный недостаточной электрической изоляцией ее от остальных электродов.

Стекло баллона лампы не является высококачественным изолятором. Поэтому между сеткой и остальными электродами существуют токи утечки. Величина их зависит от разности потенциалов и величины сопротивления между сеткой и соответствующими электродами.

4. Термоэлектронный ток сетки, обусловленный электронами, испускаемыми сеткой вследствие ее разогрева тепловым излучением катода. Эта составляющая сеточного тока заметна у ламп с оксидными катодами.

Другие составляющие сеточного тока имеют гораздо меньшее значение и принимаются во внимание только при работе со специальными «электрометрическими» лампами.

При некотором значении потенциала сетки отрицательная и положительная составляющие сеточного тока становятся равными по величине и сеточный ток в цепи сетки фактически отсутствует. Такой же потенциал принимает сетка при обрыве ее цепи, поэтому он называется потенциалом «свободной» или «плавающей» сетки. Этот потенциал, определяемый динамическим равновесием составляющих сеточного тока, подвержен флуктуациям и значение его зависит от режима лампы.

Наклон характеристики сеточного тока показывает, как меняется сеточный ток в зависимости от изменения сеточного напряжения. Котангенс угла наклона называется дифференциальным сопротивлением сетки:

$$-R_{\text{с.д}} = \operatorname{ctg} \alpha = \frac{\Delta U_{\text{с}}}{\Delta I_{\text{с}}}. \qquad (7)$$

Между точками *а* и *б* (кривая *5* на рис. 10) дифференциальное сопротивление сетки можно принять с некоторым приближением постоянным. В данной области оно отрицательно, потому что уменьшению напряжения на сетке соответствует положительное приращение сеточного тока (отрицательный ток сетки уменьшается).

Таким образом, влияние сеточного тока при усилении переменных напряжений отображается включением между управляющей сеткой и катодом лампы дифференциального сопротивления сетки.

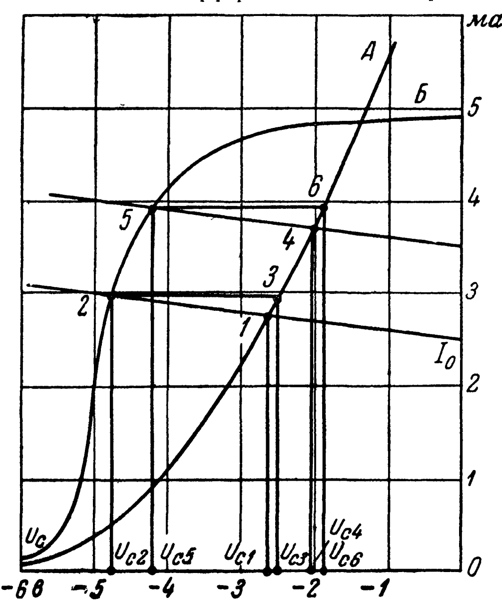


Рис. 11. Графический расчет катодного повторителя при большом сопротивлении в цепи сетки.
Лампа 6Н1П; $E_а = 150$ *в*; $U_н = 6{,}3$ *в*;
$R_с = 2{,}2 \cdot 10^9$ *ом*.

В ламповом каскаде с анодной нагрузкой сопротивление $R_{с.д}$ включено параллельное сопротивление $R_с$ утечки сетки. В катодном повторителе вследствие отрицательной обратной связи параллельно сопротивлению $R_с$ будет, очевидно, включено уже сопротивление $\frac{R_{с.д}}{1-K}$, т. е. намного большее (K — коэффициент передачи катодного повторителя).

Так как ламповые вольтметры строятся преимущественно по схемам катодных повторителей, рассмотрим подробнее влияние тока управляющей сетки на работу катодного повторителя и методику определения погрешностей, вызываемых сеточным током (рис. 11).

Кривая *А* представляет собой обычную динамическую анодно-сеточную характеристику лампы, а кривая *Б*—характеристику, снятую при наличии в цепи некоторого сопротилвения $R_с$.

При расчете обычного ($I_c R_c \approx 0$) катодного повторителя из точки на оси ординат, соответствующей току $I_{a0} = E_к / R_к$, где $R_к$ — величина сопротивления в катодной цепи, а $E_к$ — значение напряжения, к которому это сопротивление присоединено, проводится линия нагрузки под углом arctg $1/R_к$. Пересечение линии нагрузки с динамической характеристикой *А* определяет начальное положение рабочей точки (точка *1*). Чтобы найти рабочую точку при сигнале U, линию нагрузки сдвигают параллельно вправо или влево (в зависимости от знака сигнала) на величину U. Рабочая точка при этом займет, например, положение *4*.

При наличии в цепи сетки большого сопротивления R_c начальное положение рабочей точки определяется точкой пересечения линии нагрузки с характеристикой *Б* (точка *2*). Проведя из точки *2* горизонтальную прямую до пересечения с характеристикой *А*, получим точку *3*. Отрезок *2—3* показывает в соответствующем масштабе падение напряжения, создаваемое сеточным током на сопротивлении утечки сетки, т. е. $I_c R_c = U_{c3} - U_{c2}$. Тогда потенциал катода окажется выше, чем при $R_c \approx 0$, на $U_{c1} - U_{c2}$, а напряжение на сетке, таким образом, уменьшится и станет равным U_{c3}.

Для некоторого другого значения R'_c сопротивления в цепи сетки соответствующая характеристика строится путем умножения величин отрезков по горизонтали между двумя показанными динамическими характеристиками на R'_c / R_c. Так нетрудно построить семейство характеристик для нескольких различных значений сопротивления утечки сетки. По точкам пересечения линии нагрузки с этими характеристиками можно определить зависимость напряжения на катоде лампы от сопротивления в цепи ее сетки.

Результат протекания по сопротивлению R_c тока сигнала $I_и$ отображается параллельным переносом линии нагрузки вправо или влево (в зависимости от направления тока) на величину $I_и R_c$. Рабочая точка перемещается по динамической характеристике *Б*, крутизна которой отлична от крутизны характеристики *А* и зависит от величины сопротивления R_c и положения рабочей точки. Поэтому коэффициент передачи катодного повторителя зависит от величины сопротивления R_c, следствием чего является погрешность измерения тока $I_и$.

Если, например, рабочая точка займет положение *5*, то изменение напряжения сетка — катод вместо $U_{c4} - U_{c1}$ будет $U_{c6} - U_{c3}$. Зависимости погрешности от сопротивления и измеряемого тока легко могут быть построены.

В общем случае управляющая сетка лампы катодного повторителя подключается к источнику напряжения U с внутренним сопротивлением $R_{вн}$. Источник напряжения можно заменить параллельным соединением источника тока $I_{экв} = U / R_{вн}$ и сопротивления $R_{вн}$. Теперь рабочая точка будет находиться на пересечении линии нагрузки, сдвинутой параллельно себе на величину $I_{экв} R_c$, с динамической характеристикой, соответствующей сопротивлению утечки $R'_c = \dfrac{R_c R_{вн}}{R_c + R_{вн}}$.

Очевидно, что в этом случае возникает дополнительная погрешность из-за того, что начальное положение рабочей точки переместится

с характеристики, соответствующей сопротивлению R_c, на характеристику для сопротивления R'_c.

Таким образом, располагая двумя динамическими анодно-сеточными характеристиками лампы, снятыми по $R_c=0$ и при некотором R_c, можно графически построить зависимость выходного напряжения катодного повторителя от напряжения на его сетке при любых значениях R_c и определить значения погрешностей, которые вызываются сеточным током.

Если приемно-усилительная лампа работает катодным повторителем и поставлена в более или менее обычный режим, когда ток сетки определяется перечисленными выше составляющими и имеет порядок $0{,}5 \cdot 10^{-9}$—10^{-8} *а*, величина этого тока оказывается довольно стабильной. Например, величина I_cR_c для катодного повторителя, характеристики которого приведены на рис. 11, отклонялась от своего первоначального значения не более чем на $\pm 10\%$ за десятидневный период времени.

Следовательно, указанным графическим расчетом можно определить наибольшую величину R_c по заданной максимально допустимой погрешности измерения.

Чтобы свести к минимуму сеточный ток, нужно в первую очередь устранить или уменьшить перечисленные выше составляющие. Для этого лампу ставят в так называемый электрометрический режим, характеризующийся низким анодным напряжением, значительным отрицательным смещением и пониженным напряжением накала.

Обычные триоды и пентоды мало пригодны для работы в электрометрическом режиме. В самом деле, потенциал запирания триода $U_{зап} \approx E_a/\mu$. Так как статический коэффициент усиления μ определяется в основном геометрией лампы и мало зависит от режима, то лампа оказывается запертой раньше, чем потенциал анода будет снижен до величины $U_{ион}$. Поэтому обычные лампы (например, типов 6Н1П, 6К1П) можно использовать лишь в облегченном режиме, при анодных напряжениях 20—30 *в* и напряжении накала 4—5 *в*. Ток управляющей сетки при этом имеет порядок $1 \cdot 10^{-11}$ *а*.

Хорошо работают в электрометрическом режиме лампы-«желуди» типов 6Ж1Ж и 6К1Ж с управлением по третьей сетке, проницаемость которой высока. В этом случае на анод лампы и вторую сетку подают напряжение 6 *в*, на первую сетку 1 *в*; смещение третьей сетки —3,75 *в*; цепь накала питается постоянным напряжением 4 *в*. При этом анодный ток составляет 50—100 *мка*, крутизна лампы 40—80 *мка/в*, ток третьей сетки $2{,}5 \cdot 10^{-14}$—$1 \cdot 10^{-13}$ *а*.

Для измерения малых токов разработаны и выпускаются специальные электрометрические лампы, например типов 1Э1П, 1Э3П (ЭМ-4), 2Э2П и др. У них очень небольшой статический коэффициент усиления, равный всего 1—3. Для повышения сопротивления изоляции управляющей сетки ее вывод осуществлен отдельно. Мощность накала невелика, материал катода — торированный вольфрам.

В сеточном токе ламп, которые работают в электрометрическом режиме, большую роль играют фотоэлектронная составляющая, возникающая вследствие попадания на сетку различных световых и рентгеновских излучений, а также другие составляющие, например ток ионной эмиссии с катода и т. п. Чтобы уменьшить эти составляющие, в большинстве электрометрических ламп применяется

так называемая «катодная» сетка, помещенная между управляющей сеткой и катодом На эту сетку подается небольшое положительное напряжение порядка 1—2 *в* Катодная сетка выполняет двоякое назначение. Она как бы увеличивает эффективную поверхность катода, повышая тем самым крутизну лампы, и экранирует управляющую сетку от излучений катода и потока положительных ионов с него

Интерес представляет работа лампы в режиме «плавающей сетки», когда ток сетки во внешней цепи полностью отсутствует и лампа совершенно не потребляет мощности от измеряемой цепи. Однако работа лампы при этом не всегда оказывается устойчивой; лампа может самопроизвольно запираться или, наоборот, открываться Кроме того, крутизна сеточного тока вблизи точки «плавающего потенциала» (точка *в* на рис. 10) очень велика и уже при небольших отклонениях потенциала сетки от «плавающего потенциала» в сеточной цепи проходит значительный ток. Поэтому допустимые изменения напряжения сетки лампы под воздействием сигнала должны быть крайне незначительными.

Это условие выполняется в сложных катодных повторителях, которые рассматриваются в следующей главе.

Положение точки «плавающего потенциала» зависит и от режима остальных электродов лампы. Например, снижение напряжения накала сдвигает эту точку вправо Действительно, электронный ток сетки уменьшается за счет уменьшения числа и скоростей вылетающих с катода электронов, а также за счет некоторого повышения анодного напряжения (при наличии нагрузки) вследствие снижения анодного тока. Ионная же составляющая тока сетки уменьшается лишь в связи с уменьшением анодного тока. Уменьшение анодного напряжения сдвигает эту точку влево, увеличение — вправо.

Лампы, работающие в электрометрическом режиме, требуют бережного и осторожного обращения. Прежде всего баллон лампы должен быть чистым. Его желательно промыть спиртом, затем дистиллированной водой и тщательно высушить. Можно прокипятить лампу в дистиллированной воде в течение 1—2 *ч* При этом не только удаляются жир и грязь с поверхности, но и происходит выщелачивание стекла, что уменьшает поверхностную проводимость.

Лампу следует помещать в пыле- и светонепроницаемый кожух. Желательно туда же поместить осушитель — силикагель или пятиокись фосфора P_2O_5. Вывод управляющей сетки осуществляется через проходной изолятор из фторопласта-4. Лампу можно залить очищенным церезином [1]; тогда проходной изолятор и плотной кожух не нужны.

6. Входное сопротивление и входная емкость. Их измерение

Входное сопротивление вольтметра постоянному току определяется обычным образом — как отношение напряжения, действующего на входе, к току, отбираемому входной цепью вольтметра от

[1] Белое или желтое кристаллическое вещество, похожее на воск. Получается из озокерита, растворимо в бензине. Как диэлектрик имеет более ценные свойства, чем парафин Удельное электрическое сопротивление церезина 10^{16} *ом · см.*

источника измеряемого напряжения. Оно зависит от сопротивления делителя или утечки сетки R_c (если они имеются), от сопротивления изоляции входной цепи и величины сеточного тока. Из-за наличия сеточного тока входное сопротивление постоянному току может быть и меньше сопротивления R_c и больше его. По той же причине оно различно при различных входных напряжениях, т. е. зависимость входного тока $I_{вх}$ от входного напряжения $U_{вх}$ нелинейна.

Котангенс угла наклона касательной к кривой, выражающей эту зависимость, показывает дифференциальное входное сопротивление, т. е. сопротивление переменному току вольтметра при постоянной составляющей входного напряжения, соответствующей точке касания. При измерении вольтметром только переменных напряжений, без постоянной составляющей, его дифференциальное сопротивление равно котангенсу угла наклона касательной к указанной кривой в точке ее пересечения с осью абсцисс при условии, что амплитуда переменного напряжения невелика.

Вольтметр имеет также некоторую входную емкость. Поэтому в общем случае входная цепь лампового вольтметра представляется в виде параллельного соединения дифференциального входного сопротивления $R_д$ и входной емкости $C_{вх}$. Дифференциальное входное сопротивление в свою очередь есть параллельное соединение сопротивления утечек входной цепи и дифференциального сопротивления сетки лампы.

Полное входное сопротивление вольтметра

$$Z_{вх} = \frac{R_д}{\sqrt{1 + (2\pi f R_д C_{вх})^2}}. \quad (8)$$

Для определения входного сопротивления вольтметра по постоянному и переменному току необходимо измерить входной ток вольтметра. В большинстве случаев из-за незначительности токов утечек во входной цепи основной составляющей входного тока высокоомных вольтметров является сеточный ток первой лампы.

Методика измерения сеточного и входного токов одинакова, только в изложении методики в соответствующих местах выражения «цепь сетки» и «анодная цепь лампы» заменяются выражениями «входная цепь вольтметра» и «выходная цепь вольтметра».

Ток сетки при измерении методом компенсации (рис. 12,*а*) определяют по величине падения напряжения на сопротивлении известной величины, включенном в цепь сетки. Порядок измерения следующий. При замкнутом выключателе *Вк* устанавливают заданный режим лампы и отмечают ток анода по показанию миллиамперметра в анодной цепи лампы. Затем выключатель размыкают. Меняя напряжение управляющей сетки при помощи потенциометра R, доводят анодный ток лампы до ранее отмеченного значения. Ток сетки вычисляют по формуле

$$I_c = \frac{U_2 - U_1}{R_c} \; [мка], \quad (9)$$

где U_1 — заданное напряжение сетки, *в*;
U_2 — напряжение, установленное при разомкнутом выключателе, *в*;
R_c — сопротивление известной величины, *Мом*.

Для повышения точности измерения можно применить цепь компенсации тока анода, которая дает возможность точно отсчитывать малые изменения тока анода. Повысить чувствительность метода путем использования очень больших значений сопротивления $R_с$ нельзя из-за неустойчивости в этом случае режима работы лампы (см. рис. 9).

Получение полной характеристики сеточного тока требует много времени. Несколько видоизменив метод компенсации, можно быстро снять две анодно-сеточные характеристики лампы: одну — при замкнутом выключателе *Вк*, другую — при разомкнутом, т. е. при наличии сопротивления $R_с$. Такая пара характеристик была показана на рис. 11. По ней легко найти значение сеточного тока для лю-

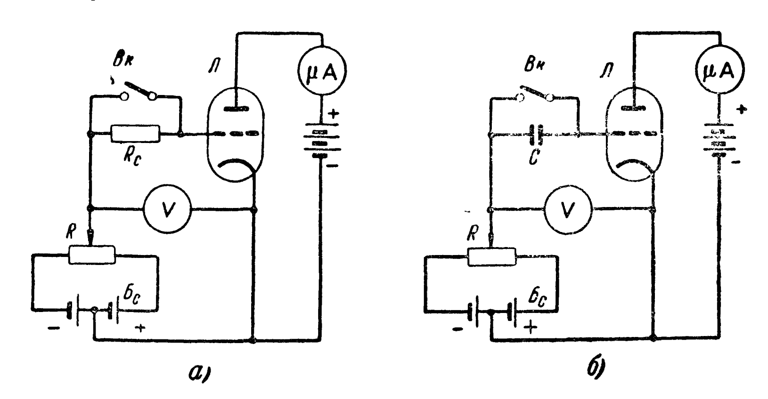


Рис. 12. Схема измерения сеточного тока лампы.
а — методом компенсации; *б* — по скорости заряда конденсатора.

бого напряжения на сетке. Например, при напряжении сетки $U_{с6}$ ток сетки равен отрезку *5—6* в масштабе оси напряжений, деленному на величину сопротивления $R_с$: 3,75 *в*/2,2 · 10⁹ *ом* = 1,7 · 10⁻⁹ *а*.

Метод компенсации очень прост. Однако при измерении малых сеточных токов ламп, работающих в электрометрическом режиме, при котором крутизна лампы очень невелика, в анодную цепь лампы необходимо включать чувствительный гальванометр, а сопротивления $R_с$ брать слишком большой величины, известной лишь приблизительно. В этих случаях прибегают к измерению сеточного тока по скорости заряда конденсатора.

При этом методе (рис. 12,*б*) между сеткой лампы и движком потенциометра *R*, с которого снимается напряжение, имитирующее сигнал, включают конденсатор *C* небольшой емкости с высоким сопротивлением изоляции. Вначале конденсатор замыкают накоротко выключателем *Вк* и снимают зависимость анодного тока лампы от напряжения на ее сетке. Затем на сетке лампы устанавливают заданное напряжение U_0 и одновременно с запуском секундомера размыкают выключатель. Конденсатор будет заряжаться сеточным током и спустя время *t* напряжение на сетке лампы станет равным

U_1. Тогда сеточный ток, если полагать его в течение времени заряда неизменным, можно определить по формуле

$$I_{\text{с}} = \frac{U_0 - U_1}{t} C. \qquad (10)$$

Напряжение U_1 определяется по анодному току в соответствии с предварительно снятой зависимостью анодного тока от напряжения на сетке лампы (другими словами, по крутизне лампы). При малых токах конденсатор C должен быть очень небольшой емкости. Роль этого конденсатора может играть входная емкость лампы, но точно измерить величину этой емкости трудно. Поэтому часто влияние входной емкости совсем исключают. Для этого производят два измерения с двумя конденсаторами, емкости которых C_1 и C_2 Значение сеточного тока подсчитывают по формуле

$$I_{\text{с}} = \frac{(U_0 - U_1)(U_0 - U_2)}{(U_0 - U_2)t_1 - (U_0 - U_1)t_2}(C_1 - C_2). \qquad (11)$$

Отметим, что для снятия кривой сеточного тока по скорости заряда конденсатора нужна определенная сноровка, потому что сеточные токи ламп, работающих в электрометрическом режиме, очень непостоянны во времени и полученные точки могут и не образовать плавную кривую.

Динамическая входная емкость вольтметра отличается от статической. Для вольтметра по схеме катодного повторителя

$$C_{\text{вх.д}} = C_{\text{с.а}} + (1 - K) C_{\text{с к}} + C_{\text{м}}, \qquad (12)$$

где $C_{\text{с.а}}$ — емкость сетка—анод лампы, превышающая такую же емкость у неработающей лампы на 1—2 *пф* из-за влияния пространственного заряда;

$C_{\text{с.к}}$ — емкость сетка—катод;

$C_{\text{м}}$ — емкость сетка—земля (монтажная),

K — коэффициент передачи катодного повторителя.

Поэтому измерять входную емкость нужно в динамическом режиме.

Из формулы (12) видно, что входная емкость постоянна лишь в том диапазоне частот, в котором коэффициент передачи K можно полагать не зависящим от частоты. В связи с этим у многих высокоомных вольтметров нельзя непосредственно измерить входную емкость, например, резонансным методом, методом замещения и другими методами, при которых используются частоты порядка сотен килогерц.

Для измерения входной емкости можно воспользоваться тем обстоятельством, что из-за наличия входной емкости величина полного входного сопротивления $Z_{\text{вх}}$ вольтметра зависит от частоты.

Пусть ко входу вольтметра подключен источник тока I, частоту которого можно менять. Тогда напряжение на входе вольтметра будет $U_{\text{вх}} = IZ_{\text{вх}}$. На низкой частоте $Z_{\text{вх}} = R_{\text{д}}$. С повышением часто-

ты значение $Z_{вх}$ уменьшается и на некоторой частоте $f_в$ оно упадет до

$$Z'_{вх} = \frac{R_д}{\sqrt{1 + (2\pi f_в R_д C_{вх.д})^2}} = \frac{R_д}{\sqrt{2}}. \qquad (13$$

В соответствии с этим напряжение на выходе вольтметра (коэффициент передачи усилителя в этой области частот считаем постоянным) также снизится до $1/\sqrt{2}$ первоначальной величины, т. е. уменьшится на 3 *дб*. Очевидно, что частота $f_в$ является верхней граничной частотой полосы пропускания вольтметра в целом. Из соотношения (13) можно найти входную емкость:

$$C_{вх\,д} = \frac{1}{2\pi R_д f_в}. \qquad (14$$

Практически вместо источника тока достаточно иметь источник напряжения U с активным внутренним сопротивлением $R_{вн}$ примерно той же величины, что и $R_д$. При замене его эквивалентным источником тока (рис. 7) все предыдущие рассуждения остаются справедливыми, только величина $R_д$ станет равной $R_д'$:

$$R'_д = \frac{R_д R_{вн}}{R_д + R_{вн}}, \qquad (15)$$

которое и должно быть подставлено в формулу (14).

В простейшем случае источником тока может служить генератор звуковой частоты с последовательно включенным активным добавочным сопротивлением $R_{вн}$ нужной величины. Во избежание ошибок паразитная емкость этого сопротивления должна быть много меньше входной емкости вольтметра.

Иногда полоса пропускания вольтметра ограничивается полосой пропускания электронного усилителя. Этот случай будет рассмотрен в следующей главе.

Входную емкость можно также измерить по одному из способов, которые будут рассмотрены в гл. 6.

Постоянная времени входной *RC*-цепи высокоомных измерительных устройств может быть значительной, что ограничивает полосу пропускания устройства. Особенно это сказывается при измерении малых токов. Поэтому высокоомные вольтметры всегда имеют цепи отрицательных обратных связей. При этом постоянная времени входа уменьшается в $A\beta$ раз, где A — коэффициент усиления усилителя без обратной связи, а β — коэффициент обратной связи.

Заметим, что в электрометрии и в импульсной технике часто вместо понятия верхней граничной частоты полосы пропускания оперируют понятием времени нарастания $T_н$, в течение которого сигнал возрастает от 0,1 до 0,9 своего установившегося значения. Величины эти связаны соотношением

$$T_н f_в = \frac{1}{3}. \qquad (16)$$

Глава третья

ВОЛЬТМЕТРЫ ПО СХЕМАМ КАТОДНЫХ ПОВТОРИТЕЛЕЙ

7. Простые катодные повторители

На рис. 13 показана схема вольтметра, высокое входное сопротивление которого обеспечивается включением в цепь катода первой лампы большого сопротивления, порядка десятков мегомов. При этом напряжение на сетке лампы устанавливается близким к потенциалу запирания, анодный ток лампы составляет доли микроампера, и, таким образом, электронная и ионная составляющие сеточного тока практически отсутствуют. Сеточный ток определяется почти целиком сопротивлением изоляции участка сетка — анод, потому что анодное напряжение лампы довольно велико.

При подаче на вход вольтметра положительного сигнала ток утечки сетки первой лампы уменьшается, так как уменьшается раз-

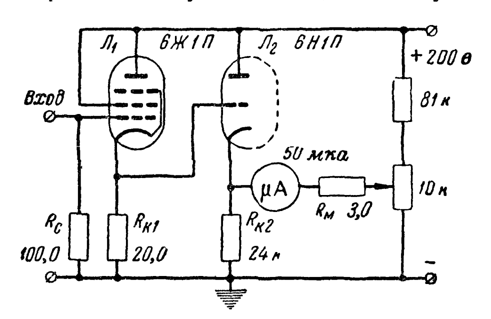


Рис. 13. Вольтметр по схеме простого катодного повторителя с большим сопротивлением в цепи катода

ность потенциалов между сеткой и анодом, а разность потенциалов между сеткой и катодом остается почти без изменений.

Чтобы снизить ток утечки сетки по внешней поверхности баллона, в качестве первой лампы используют лампу с отдельным выводом сетки (6Ж1Ж, 6Ф5М и т. п.), вокруг которого с помощью коллоидального графита наносят «охранное кольцо». На это кольцо подают потенциал (с катода лампы $Л_1$ или $Л_2$), который близок к потенциалу сетки. Поскольку разности потенциалов между сеткой и кольцом почти нет, ток утечки по стеклу также отсутствует.

Показывающий прибор подключают через второй катодный повторитель на лампе $Л_2$ из-за незначительной величины анодного тока лампы $Л_1$. Сопротивлением утечки сетки лампы $Л_2$ служит выходное сопротивление первого катодного повторителя (а не одно лишь сопротивление $R_{к1}$). Поэтому, грубо говоря, вне зависимости от величины сопротивления $R_{к1}$ сеточный ток лампы $Л_2$ не будет оказывать влияния на работу вольтметра, пока этот ток много меньше анодного тока лампы $Л_1$. При слишком же малом анодном токе лампы $Л_1$ будут наблюдаться хаотические колебания стрелки

выходного прибора вследствие временной нестабильности сеточного тока лампы $Л_2$.

Верхний предел измерения определяется границей линейного участка характеристик катодных повторителей и для сигналов положительной полярности приблизительно равен ($E_а$ —50) *в*, где $E_а$ — напряжение источника анодного питания.

Для сигналов отрицательной полярности предел измерения ограничен несколькими вольтами. Но его можно расширить до любого значения, если катодные цепи ламп подключить не к «земле», а к источнику отрицательного напряжения, увеличив соответственно величины сопротивлений $R_{к1}$ и $R_{к2}$.

Вольтметр, который был собран по указанной схеме, имел следующие характеристики Шкала 0—150 *в*, нелинейность шкалы

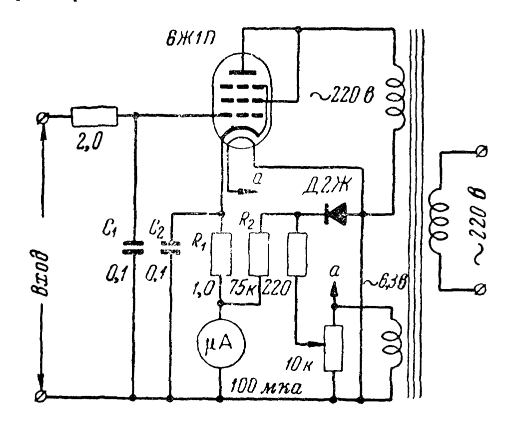


Рис. 14. Вольтметр по схеме катодного повторителя с питанием цепи анода переменным током

менее 1%. Суммарный коэффициент передачи 0,91, дрейф «нуля» после 15 *мин* прогрева 40 *мв/ч* Величина сеточного тока изменялась от $4{,}9 \cdot 10^{-11}$ до $1{,}6 \cdot 10^{-11}$ *а*, будучи примерно пропорциональной напряжению сетка — анод, причем баллон лампы и ламповая панель специальной очистке не подвергались.

С лампой 6Ж1Ж результаты оказались приблизительно такими же. Нанесение «охранного кольца» уменьшило сеточный ток примерно втрое

При величинах сопротивлений $R_{к1}=100$ *Мом* и $R_{к2}=100$ *ком* и подключении их к источнику отрицательного напряжения $E_к=-200$ *в* коэффициент передачи составлял 0,93.

И в первом и во втором случаях значения сопротивления $R_{к1}$ оптимальны. Их увеличение вызывает заметную нестабильность «нуля».

На рис. 14 приведена схема вольтметра, представляющего собой катодный повторитель с питанием анода переменным напряжением.

Можно рассматривать его и как выпрямитель с регулируемым вентилем, работающий на нагрузку, которая состоит из сопротив-

ления R_1 и сглаживающей емкости C_2. Микроамперметром измеряется ток нагрузки, пропорциональный сигналу. Начальный ток, протекающий через прибор при отсутствии напряжения на сетке лампы, компенсируется при помощи вспомогательного выпрямителя на германиевом диоде. Диод может быть любого типа.

В течение части периода питающего напряжения в цепи сетки протекает положительный сеточный ток, а затем отрицательный. Положительный электронный ток будет преобладать при высоких уровнях сигнала, а отрицательный ионный — при малых Суммарный сеточный ток, усредняемый емкостью C_1, невелик.

При указанных на схеме данных вольтметр имеет следующие характеристики. Верхний предел измерения 100 *в*, нелинейность шкалы менее 1,5%. Сеточный ток в начале диапазона отрицателен и равен $1{,}6 \cdot 10^{-12}$ *а*, в конце диапазона положителен и равен $2 \cdot 10^{-11}$ *а*. При входном напряжении около 20 *в* он равен нулю. Для получения меньших шкал нужно соответственно уменьшить сопротивления R_1 и R_2

Рассмотренные в этом параграфе вольтметры пригодны для измерения напряжений лишь постоянного тока Кроме того, коэффициенты передачи простых катодных повторителей заметно отличаются от единицы, что не дает возможности использовать их в качестве высокоомных приставок к имеющимся показывающим вольтметрам.

Вместе с тем они очень просты в изготовлении и имеют довольно высокое входное сопротивление, что в ряде случаев является решающим обстоятельством при выборе схемы вольтметра.

8. Сложные катодные повторители

С целью улучшения характеристик катодных повторителей (особенно электрометрических) в их схемы вводят различные дополнительные лампы и цепи, выполняющие вспомогательные функции Такие катодные повторители называют сложными.

В первую очередь усложнения связаны с задачами повышения величины полного входного сопротивления $Z_{вх}$ и расширения амплитудной характеристики. В самом деле, из-за низкого напряжения на аноде электрометрической лампы допустимые изменения потенциала напряжения на ее сетке ограничиваются величиной порядка 1 *в*, в то время как вольтметры предназначены для измерений напряжений в десятки и сотни вольт.

Для повышения входного сопротивления необходимо увеличивать величину сопротивления $R_д$ и уменьшать входную емкость $C_{вх.\,д}$.

Составляющую сопротивления $R_д$, определяемую токами утечки, увеличивают двойным экранированием входной цепи. Внутренний экран выполняет роль «охранного кольца» входного проводника, а наружный экран заземляют для предохранения входа от различных наводок. При этом эффективное сопротивление утечки возрастает во столько раз, во сколько разность потенциалов между входным зажимом и внутренним экраном станет меньше разности потенциалов между входным зажимом и «землей». Если, например, внутренний экран соединен с выходным зажимом катодного повто-

рителя, коэффициент передачи которого равен K, то эффективное сопротивление утечки возрастет в $1/1-K$ раз.

Составляющую входного сопротивления, определяемую сеточными токами лампы, можно уменьшить, если применить в вольтметре электрометрические лампы. При правильном выборе их режима работы дифференциальное сопротивление сетки может быть доведено в отдельных случаях до 10^{16} *ом.*

Однако при заданной частотной характеристике вольтметра уменьшать активную составляющую входной проводимости имеет смысл только при достаточно малой емкости входной цепи, так как, например, даже емкость 1 *пф* на частоте 100 *кгц* имеет сопротивление всего лишь 1,6 *Мом.*

Из формулы (12) видно, что у простого катодного повторителя входная емкость не может быть сделана очень малой, в основном из-за наличия емкости $C_{с.\,а}$, которая не испытывает воздействия со стороны коэффициента передачи катодного повторителя. Емкость $C_м$ при присоединении экрана (внутреннего — при двойном экранировании) входного кабеля к катоду становится частью емкости $C_{с.\,к}$.

У электрометрических каскадов с катодной нагрузкой входная емкость еще увеличена в связи с тем, что коэффициент передачи электрометрических катодных повторителей гораздо меньше единицы. Это очень важное обстоятельство, и на нем нужно остановиться подробнее.

Известно, что закон Ома для триода записывается так:

$$I_а = \frac{\mu U_{с.к} + U_{а.к}}{R_i}\ [ма], \qquad (17)$$

где $U_{с.к}$ — напряжение между сеткой и катодом лампы, *в*;

$U_{а.к}$ — напряжение между анодом и катодом лампы, *в*;

R_i — внутреннее сопротивление лампы, *ком.*

Следует заметить, что напряжения $U_{с.к}$ и $U_{а.к}$ в действительности представляют собой изменения напряжений между электродами под воздействием сигнала, приложенного к какому-либо электроду лампы.

Для простого катодного повторителя $U_{с.к} = U_{вх} - I_а R_к$; $U_{а.к} = -I_а R_к$ и $U_{вых} = I_а R_к$. Подставив эти значения в формулу (17), после преобразований получим выражение для коэффициента передачи катодного повторителя:

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{\mu R_к}{R_i + (1+\mu) R_к} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\mu} + \frac{1}{SR_к}}. \qquad (18)$$

Выше указывалось, что для электрометрических ламп $\mu = 1 \div 3$. Поэтому даже при очень больших сопротивлениях катодной нагрузки коэффициент передачи электрометрических катодных повторителей составляет всего лишь 0,5—0,75.

Уменьшение коэффициента передачи приводит к возрастанию не только входной емкости, но также и нелинейных искажений, так

как рабочая точка при этом перемещается по значительно большему участку динамической характеристики.

Значение коэффициента передачи каскада с катодной нагрузкой может быть значительно приближено к единице, если на анод лампы подать напряжение, примерно равное входному и совпадающее с ним по фазе. Ламповый каскад в этом случае является не только «катодным», но и «анодным» повторителем.

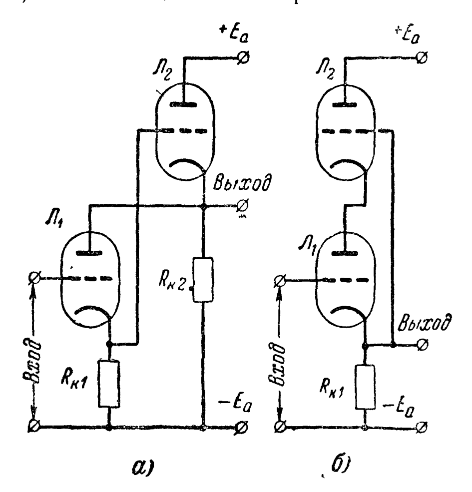


Рис. 15. Основные схемы сложных катодных повторителей.
а — параллельная; б — последовательная

С этой целью на анод лампы катодного повторителя подается его же выходное напряжение через второй катодный повторитель с коэффициентом передачи K_2. Чтобы для такой схемы найти выражение коэффициента передачи по уравнению (17), в него должно быть подставлено иное значение напряжения анод — катод, а именно:

$$U_{а.к} = -I_а R_к + I_а R_к K_2 = -(1 - K_2) I_а R_к.$$

В результате

$$K_1 = \frac{1}{1 + \frac{1 - K_2}{\mu} + \frac{1}{SR_к}}. \qquad (19)$$

Очевидно, что при $K_2 \approx 1$ коэффициент передачи не зависит от значения μ и при достаточно большой величине сопротивления катодной нагрузки $R_к$ может быть сделан очень близким к единице.

Для иллюстрации эффективности этого метода укажем, что коэффициент передачи простого катодного повторителя на электрометрической лампе ЭМ-4 ($\mu = 2{,}2$; $R_i = 27{,}5$ *ком*) при $R_к = 200$ *ком* состав-

ляет 0,66, в то время как подача на анод лампы повторителя напряжения 0,9 $U_{вых}$ поднимает значение коэффициента передачи до 0,904, подача 0,99 $U_{вых}$ — до 0,94, а одновременное увеличение величины $R_к$ до 1 *Мом* — до 0,997.

На рис. 15 показаны две основные схемы таких катодных повторителей: параллельная и последовательная. Удобнее вначале рассмотреть работу и расчет параллельной схемы.

Лампа $Л_1$ — электрометрическая или какая-либо иная, поставленная в электрометрический режим. Лампа $Л_2$ — с большой допустимой мощностью рассеяния на аноде и рабочим током 20—50 *ма*.

Анодный ток лампы $Л_1$ много меньше анодного тока лампы $Л_2$,

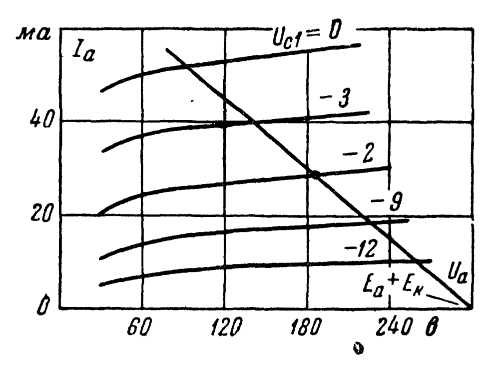


Рис. 16. Семейство анодных характеристик лампы 6П6С при $U_{c2} = 100$ *в*.

поэтому в первом приближении каждый катодный повторитель можно рассматривать независимо. И так как напряжение анод — катод лампы $Л_1$ равно напряжению сетка — катод лампы $Л_2$, начальное положение рабочей точки можно найти следующим образом.

Строят зависимость напряжения на катоде $Л_2$ от напряжения на ее сетке, для чего на семействе анодных характеристик лампы $Л_2$ проводят обычным образом линию нагрузки под углом arctg $R_{к2}$ из точки на горизонтальной оси, соответствующей полному напряжению источника анодного питания (рис. 16). Пусть это полное напряжение питания разделено так, что анодная цепь питается напряжением $+E_a$ *в* и катодная $-E_к$ *в*. Тогда потенциал катода $U_{к2}=E_a-U_{а.к2}$ и указанная зависимость (рис. 17, линия *1*) строится по соотношению

$$U_{c2}=U_{к2}+U_{с.к2}=E_a-U_{а.к2}+U_{с.к2}. \qquad (20)$$

Затем на том же графике нужно построить зависимость изменения напряжения на катоде лампы $Л_1$ от изменения напряжения на ее аноде. Необходимое для этого уравнение получим следующим путем. При изменении потенциала анода лампы $Л_1$ на величину U_{a1} изменение напряжения между сеткой и катодом составит $U_{с.к1}=-I_{a1}R_{к1}$, а изменение напряжения между анодом и катодом

будет $U_{а\,к1}=U_{а1}-I_{а1}R_{к1}$. Подставив эти выражения в формулу (17) и учитывая, что $U_{к1}=I_{а}R_{к1}$, получим:

$$\frac{U_{а1}}{U_{к1}}=\frac{1}{R_i/R_{к1}+1+\mu}. \qquad (21)$$

Отношение $R_i/R_{к1}$ в подобных схемах всегда гораздо меньше единицы. Поэтому из начала координат ($U_{с1}=U_{а1}=0$) проводят прямую под углом arctg $1/1+\mu_1$ (линия *2* на рис. 17) и, так как $U_{с2}=U_{к1}$ и $U_{к2}=U_{а1}$, то точка пересечения построенных таким образом линий определит начальное положение рабочей точки.

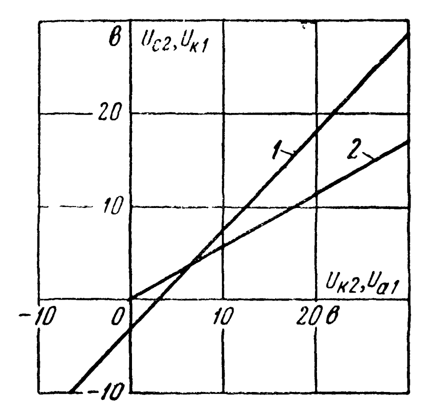


Рис. 17. Графический расчет начального положения рабочей точки сложного катодного повторителя параллельного типа.

Расчет выполнен для ламп ЭМ-4 и 6П6С.

В качестве лампы $Л_2$ предпочтение следует отдать пентоду, хотя это и связано с необходимостью иметь дополнительный изолированный источник питания экранирующей сетки. Во-вторых, коэффициент передачи пентодного повторителя выше, чем триодного. Например, повторитель на лампе 6П6С в триодном включении при $R_к=4$ *ком* имеет коэффициент передачи порядка 0,85, а в пентодном включении — 0,925. Во-вторых, регулируя напряжение на экранирующей сетке, можно менять режим работы лампы $Л_1$. Так, при снижении напряжения на этой сетке лампы $Л_2$ напряжение $U_{а.\,к1}$ уменьшается. Необходимые для расчетов семейства анодных характеристик пентодов при различных напряжениях на экранирующих сетках можно получить пересчетом имеющегося семейства для какого-либо одного значения этого напряжения по методу, опубликованному, например, в журнале «Радио» № 2 за 1953 г.

Коэффициент передачи первого катодного повторителя на лампе $Л_1$ может быть определен по формуле (19), где K_2 — коэффициент передачи второго катодного повторителя на лампе $Л_2$:

$$K_2=\frac{1}{1+\frac{1}{\mu_2}+\frac{1}{S_2R_{к2}}}. \qquad (22)$$

Формула дает верный результат при условии, что анодным током лампы $Л_1$ можно пренебречь по сравнению с анодным током лампы $Л_2$. В общем же случае значение K_1 находят анализом параллельной схемы с учетом взаимного влияния цепей обеих ламп.

Этот анализ несложен. Из схемы видно, что напряжения анод — катод и сетка — катод ламп $Л_1$ и $Л_2$ равны:

$$\left.\begin{aligned} U_{\text{с.к}1} &= U_{\text{вх}} - I_{\text{а}1}R_{\text{к}1}; \\ U_{\text{а.к}1} &= -I_{\text{а}1}(R_{\text{к}1} + R_{\text{к}2}) + I_{\text{а}2}R_{\text{к}2}; \\ U_{\text{с.к}2} = I_{\text{а}1}(R_{\text{к}1} - R_{\text{к}2}) - I_{\text{а}2}R_{\text{к}2};& \quad U_{\text{а.к}2} = I_{\text{а}1}R_{\text{к}2} - I_{\text{а}2}R_{\text{к}2}. \end{aligned}\right\} \tag{23}$$

Подставив поочередно для каждой лампы соответствующие значения в формулу (17), получим два уравнения, из совместного решения которых с учетом того, что $U_{\text{к}1} = I_{\text{а}1}R_{\text{к}1}$, найдем:

$$K_1 = \frac{U_{\text{к}1}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1}{1 + \frac{1 - K_2}{\mu} + \frac{1}{S_1R_{\text{к}1}} + \frac{K_2}{\mu_1 S_1 R_{\text{к}1}}}. \tag{24}$$

Последний член в знаменателе и учитывает тот факт, что часть анодного тока лампы $Л_2$ ответвляется в анодную цепь лампы $Л_1$

Полный коэффициент передачи сложного катодного повторителя по параллельной схеме

$$K = \frac{U_{\text{к}2}}{U_{\text{вх}}} = K_1K_2\left(1 - \frac{1}{S_2R_{\text{к}1}}\right) \approx KK_2. \tag{25}$$

Его выходное сопротивление

$$R_{\text{вых}} \approx 1/S_2. \tag{26}$$

Выражение для коэффициента передачи сложного катодного повторителя по последовательной схеме можно получить из следующих рассуждений. Последовательная схема отличается от параллельной лишь отсутствием сопротивления $R_{\text{к}2}$ (роль его выполняет лампа $Л_1$).

Поэтому, полагая в формулах (22) и (24) $R_{\text{к}2} = \infty$, получаем выражение для коэффициента передачи последовательной схемы:

$$K_{\text{с.к}1} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\mu_1(1+\mu_2)} + \frac{1}{SR_{\text{к}1}} + \frac{\mu_2}{\mu_1(1+\mu_2)S_2R_{\text{к}1}}}. \tag{27}$$

Аналогичным образом из формулы (25) может быть определен и коэффициент передачи последовательной схемы от сетки к аноду лампы $Л_1$:

$$K_{\text{с.а}1} \approx \frac{\mu_2}{1 + \mu_2} K_{\text{с.к}1}. \tag{28}$$

Благодаря тому, что емкость сетка — анод входной лампы в сложных катодных повторителях также испытывает воздействие со стороны коэффициента передачи, входная динамическая емкость сложных катодных повторителей неизмеримо меньше, чем простых.

Для катодного повторителя по параллельной схеме

$$C_{\text{вх.д}} = (1 - K_1) C_{\text{с.к1}} + (1 - K) C_{\text{с.а1}} + C_{\text{м}}. \qquad (29)$$

Для повторителя по последовательной схеме

$$C_{\text{вх.д}} = (1 - K_{\text{с.к1}}) C_{\text{с.к1}} + (1 - K_{\text{с.а1}}) C_{\text{с.а1}} + C_{\text{м}}. \qquad (30)$$

Входную цепь (чаще всего вместе с входной лампой $Л_1$) экранируют, причем экран соединяют с выходным зажимом устройства. В связи с этим вместо емкости входной цепи относительно земли появляется емкость входной цепи относительно экрана, которая в последовательной схеме является частью емкости $C_{\text{с к1}}$, а в параллельной — частью емкости $C_{\text{с а1}}$. Величина ее в динамическом режиме уменьшается точно так же, как и величины этих последних емкостей. Очень небольшая емкость сетки относительно земли может сохраняться лишь в самой лампе между вводами сетки и нитью накала. Именно эту величину и отображает в вышеприведенных формулах символ $C_{\text{м}}$.

Приблизительно рассчитать верхнюю границу частотной характеристики сложного катодного повторителя можно следующим образом.

Между катодом входной лампы $Л_1$ и землей имеется емкость $C_{\text{к1}}$, включающая в себя емкость катода относительно нити накала (в лампах прямого накала — емкость между цепью накала и землей), входную емкость катодного повторителя на лампе $Л_2$, емкость монтажа, а при последовательной схеме — еще и емкость экрана входной цепи. Поэтому скорость изменения напряжения на катоде лампы $Л_1$ определяется скоростью заряда емкости $C_{\text{к1}}$ анодным током входной лампы.

Пусть начальный анодный ток входной лампы составляет $I_{\text{а0}}$. Обычно он равен примерно половине максимально допустимого анодного тока $I_{\text{а.макс}}$. При повышении потенциала управляющей сетки лампы $Л_1$ ее анодный ток изменяется в пределах от $I_{\text{а0}}$ до $I_{\text{а.макс}}$. Считая для простоты, что емкость $C_{\text{к1}}$ заряжается постоянным током $\frac{I_{\text{а.макс}} - I_{\text{а0}}}{2} \approx \frac{I_{\text{а.макс}}}{4}$, получим наибольшую скорость изменения входного напряжения, воспроизводимую на выходе:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{I_{\text{а.макс}}}{4C_{\text{к1}}}. \qquad (31)$$

Очевидно, что чем большее напряжение прикладывается к управляющей сетке, тем медленнее оно должно нарастать, чтобы емкость $C_{\text{к1}}$ успевала заряжаться. Поэтому полоса пропускания сложного катодного повторителя зависит от амплитуды входного напряжения. Она наименьшая при максимально допустимом входном напряжении. Полагая в предыдущей формуле $\Delta U = U_{\text{вх макс}}$, а $\Delta t = T_{\text{н}}$ и учитывая формулу (16), получим верхнюю граничную частоту полосы пропускания при наибольшем входном сигнале:

$$f_{\text{в.мин}} = \frac{I_{\text{а.макс}}}{12 U_{\text{вх.макс}} C_{\text{к1}}}. \qquad (32)$$

Для лампы ЭМ-4 при $U_{вх\ макс} = 100$ *в* и $C_{к1} = 10$ *пф*

$$f_в = \frac{200 \cdot 10^{-6}}{12 \cdot 100 \cdot 10 \cdot 10^{-12}} = 16,7 \text{ кгц}$$

При меньших сигналах полоса пропускания соответственно расширяется

Заметим, что с повышением частоты входного напряжения изменение разности потенциалов между управляющей сеткой входной лампы и ее катодом увеличивается и, следовательно, уменьшается входное сопротивление (как его активная составляющая, так и емкостная)

При необходимости расширить полосу пропускания сложного катодного повторителя анодный ток лампы $Л_1$ увеличивают повышением анодного напряжения Это можно осуществить при помощи схем, изображенных на рис 18 При этом, естественно, приходится мириться с некоторым возрастанием сеточного тока лампы $Л_1$

Так как

$$1 - K_1 = \frac{U_{с\ к1}}{U_{вх}} \text{ и } 1 - K = \frac{U_{с\ а1}}{U_{вх}}$$

и эти величины могут быть измерены достаточно точно при помощи лампового вольтметра, то, измерив емкости $C_{с\ к}$ и $C_{с\ а1}$ готового устройства в холодном состоянии, можно с хорошим приближением вычислить динамическую входную емкость сложного катодного повторителя

Сложные катодные повторители с электрометрическими лампами на входе пригодны для передачи напряжений, которые по величине намного превышают напряжение между анодом и катодом самой электрометрической лампы Очевидно, что предельные значения входного напряжения определяются границами линейного участка динамической характеристики катодного повторителя на лампе $Л_2$ и примерно равны $E_а$—50 *в* и $E_к$ В этом диапазоне режим работы входной лампы меняется мало, что создает очень благоприятные условия для использования ее в режиме «плавающей сетки»

Необходимые значения коэффициентов передачи от сетки входной лампы к ее катоду и аноду тесно связаны с максимальной величиной напряжения $U_{вх\ макс}$, которое может быть приложено ко входу сложного катодного повторителя

Предположим, что заданное допустимое изменение разности потенциалов между сеткой входной лампы и ее катодом или анодом составляет ΔU *в* Тогда величина соответствующего коэффициента передачи должна быть

$$K \geqslant 1 - \frac{\Delta U}{U_{вх\ макс}}. \qquad (33)$$

Значение ΔU определяется либо по наибольшему допустимому сеточному току входной лампы, либо по нужной степени линейности характеристики Считая для электрометрической лампы $\Delta U_{с\ а} = 1$ *в*, при $U_{вх\ макс} = 200$ *в*, например, необходимо иметь $K_{с\ а} \geqslant 0,995$.

Если сложный катодный повторитель построить непосредственно по основной схеме (рис. 15), то коэффициент передачи будет гораз-

до ниже этого значения Практически его пределы измерения были бы порядка ±50 *в* при общем коэффициенте передачи около 0,9.

Чтобы значения коэффициентов передачи существенно приблизить к единице, основные схемы должны быть несколько видоизменены.

В параллельной схеме вместо сопротивлений $R_{к1}$ и $R_{к2}$ в катодные цепи ламп $Л_1$ и $Л_2$ включают лампы. С помощью уравнения (17) легко показать, что включенная в качестве катодной нагрузки радиолампа — обозначим ее, например, $Л_3$ — эквивалентна сопротивлению

$$R'_{к1} = R_{i3} + (1 + \mu_3) R_{к3}. \tag{34}$$

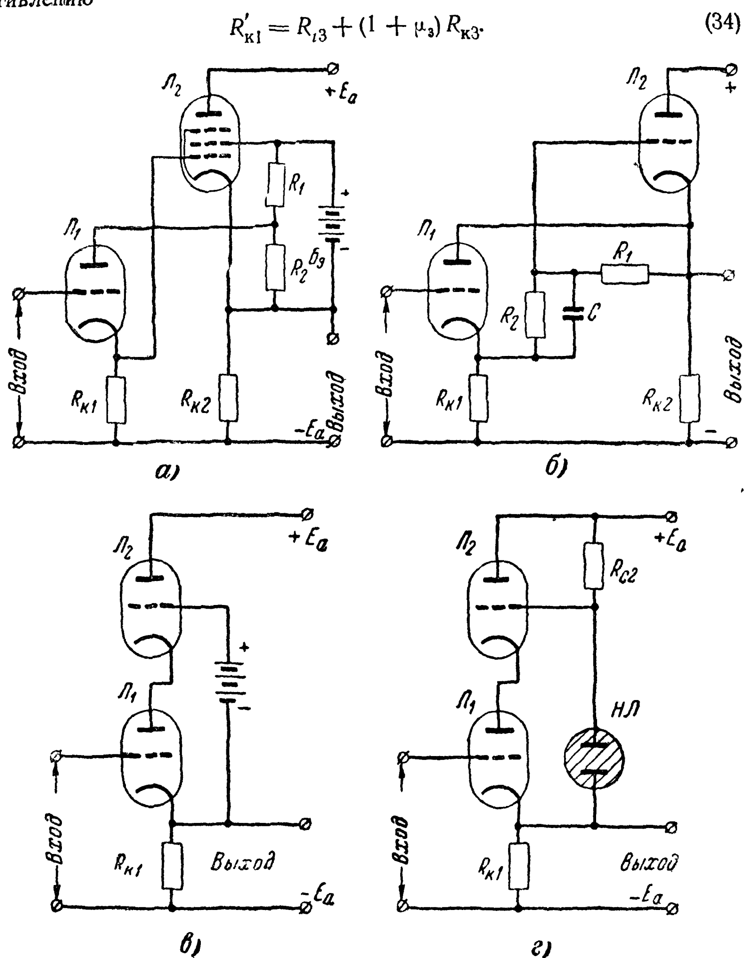


Рис. 18 Способы повышения анодного напряжения входной лампы в сложных катодных повторителях.

Наиболее подходят для этой цели пентоды, работающие на горизонтальном участке анодной характеристики, так как значения внутреннего сопротивления R_i и статического коэффициента усиления μ пентодов гораздо выше, чем у триодов.

Если включен пентод, то

$$R'_{\text{к}1} = R_{i3} + (1 + S_3 R_{\text{к}3}). \tag{35}$$

При этом в выражения для коэффициентов передачи вместо $R_{\text{к}1}$ и $R_{\text{к}2}$ следует подставить $R'_{\text{к}1}$ и $R'_{\text{к}2}$ (последнее получается аналогично $R'_{\text{к}1}$).

При большом сопротивлении катодной нагрузки коэффициент передачи катодного повторителя близок к величине $\mu/1+\mu$. Отсюда следует, что лампа $Л_2$ должна быть пентодом.

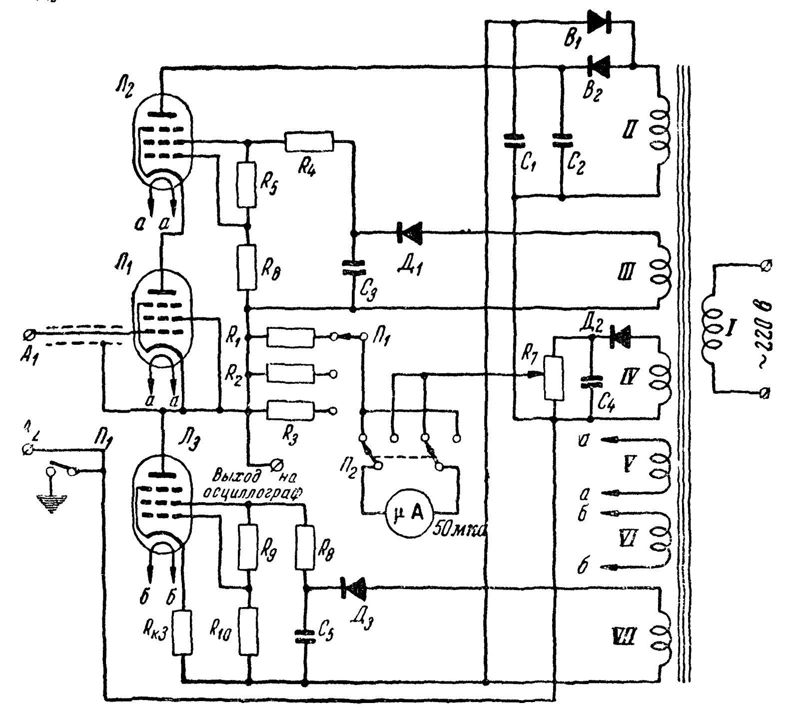


Рис. 19. Принципиальная схема сложного катодного повторителя последовательного типа со вспомогательными цепями.

На рис. 19 показана полная схема сложного катодного повторителя последовательного типа. Напряжения на экранирующие сетки пентодов $Л_2$ и $Л_3$ снимаются с выпрямителей на диодах $Д_1$ и $Д_3$, питающихся от отдельных изолированных обмоток силового транс-

форматора На управляющую сетку лампы $Л_3$ подается положительный относительно ее катода потенциал. Это дает возможность увеличить величину сопротивления $R_{к3}$, а тем самым $R'_{к1}$.

Когда напряжение на управляющей сетке лампы $Л_1$ равно нулю, потенциал выходного зажима лампы $Л_3$ несколько выше потенциала «земли». Поэтому, для того чтобы иметь возможность устанавливать указатель показывающего прибора на нулевую отметку, предусматривается выпрямитель на диоде $Д_2$, питающийся от отдельной обмотки с напряжением 6,3 *в*.

Зажим A_2 нормально заземлен, но он может быть подключен в измеряемой цепи к точке с низким сопротивлением, например к катоду лампы для непосредственного измерения разности потенциалов сетка — катод.

Наибольшее напряжение, которое может быть приложено к входу вольтметра, определяется напряжением анодного питания. Однако нужно иметь в виду, что анодное напряжение лампы $Л_2$ или $Л_3$ (в зависимости от полярности сигнала) более чем вдвое превысит при этом входное напряжение. Анодное напряжение такой величины не должно быть для этих ламп пробойным. Используя лампы с отдельным выводом анода (СО-257, 6Ж1Ж, 6П13С), верхние пределы измерения можно довести до ± 500 *в*.

Из-за малой величины анодного тока (200—300 *мка*) выходное сопротивление подобного катодного повторителя довольно велико и на низшем пределе измерения добавочное сопротивление к микроамперметру нужно подбирать с учетом этого выходного сопротивления. Поэтому изменения параметров ламп будут влиять на градуировку.

На рис. 20 показана полная схема сложного катодного повторителя параллельного типа. Работа ее понятна без особых пояснений. Лампу $Л_1$ часто вместе с батареей накала помещают в выносной пробник. Эта лампа может быть и электрометрическим тетродом. Его катодная сетка должна быть соединена с анодом через сопротивление величиной порядка 5 *ком* (для 1Э1П). Сопротивление R_5 служит для установки «нуля».

Оба рассмотренных устройства могут быть оформлены как самостоятельные вольтметры со встроенными показывающими приборами, а также служить приставками к имеющимся вольтметрам (поскольку их коэффициент передачи очень близок к единице) и осциллографам.

Для последних применений предпочтение следует отдать повторителю параллельного типа, как имеющему более низкое выходное сопротивление и более широкую полосу пропускания (несколько сотен килогерц). Объясняется это тем, что в связи с разделением цепей ламп оконечная лампа $Л_2$ может быть достаточно мощной, с большим анодным током и большой крутизной. Поэтому емкости, которые входной экран и источник питания экранирующей сетки лампы $Л_2$ имеют относительно земли, будучи подключенными к катоду мощной лампы, оказывают гораздо меньшее влияние на полосу пропускания, чем если бы они подключались к катоду лампы $Л_1$.

Лампы $Л_2$ и $Л_4$ могут быть типов 6П3С, 6П7С, 6П13С. Однако следует иметь в виду, что верхние пределы измерений ограничиваются допустимой мощностью рассеяния на анодах этих ламп и в катодных повторителях параллельного типа эти пределы меньше, чем в повторителях последовательного типа.

Если пределы измерений должны быть выше 200 *в*, можно рекомендовать выполнить источник анодного питания изолированным, а между ним и «землей» ввести дополнительный маломощный регулируемый источник напряжения.

В сложных катодных повторителях, предназначаемых для передачи только переменных напряжений, вместо пентодов могут быть использованы триоды. При этом отпадает необходимость в изолированных источниках для питания цепей экранирующих сеток и

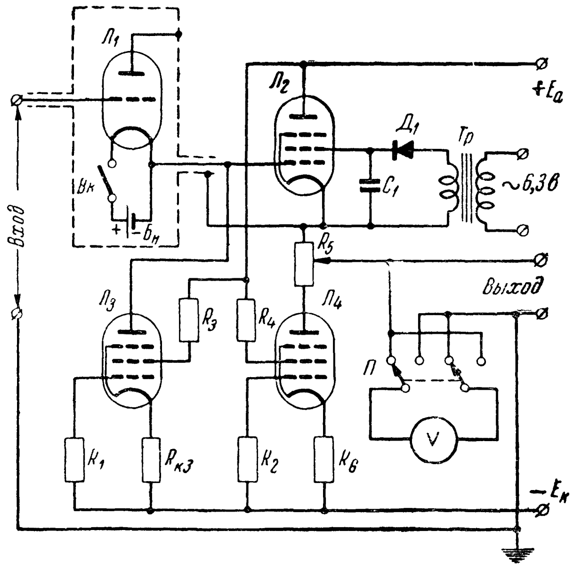


Рис. 20. Принципиальная схема сложного катодного повторителя параллельного типа.

устраняются связанные с ними довольно значительные паразитные емкости, а снижение коэффициента передачи может быть компенсировано включением дополнительной лампы, как это показано на рис. 21. Лампа $Л_4$ в данной схеме играет для лампы $Л_2$ ту же роль, что лампа $Л_2$ для лампы $Л_1$.

При включении подобным образом нескольких дополнительных ламп коэффициент передачи в принципе может быть сделан сколь угодно близким к единице. На практике включение одной лампы дает уже вполне достаточный эффект.

В этом случае коэффициент передачи

$$K = \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{\mu_1(1+\mu_2)(1+\mu_4)} + \cfrac{1}{S_1 R'_{к1}} + \rightarrow}$$

$$\rightarrow + \frac{R_{i2}}{\mu_1(1+\mu_2)R'_{к1}} + \frac{R_{i4}}{\mu_1(1+\mu_2)(1+\mu_4)R'_{к1}}. \qquad (36)$$

При сравнении выражений (18), (27) и (36) видна определенная закономерность их написания при увеличении числа последовательно включаемых ламп. Поэтому при необходимости не составит труда написать выражение для коэффициента передачи катодного повторителя такого типа с любым количеством ламп.

Из формулы (36) следует, что особое внимание должно быть обращено на повышение сопротивления $R'_{к1}$. В первую очередь это

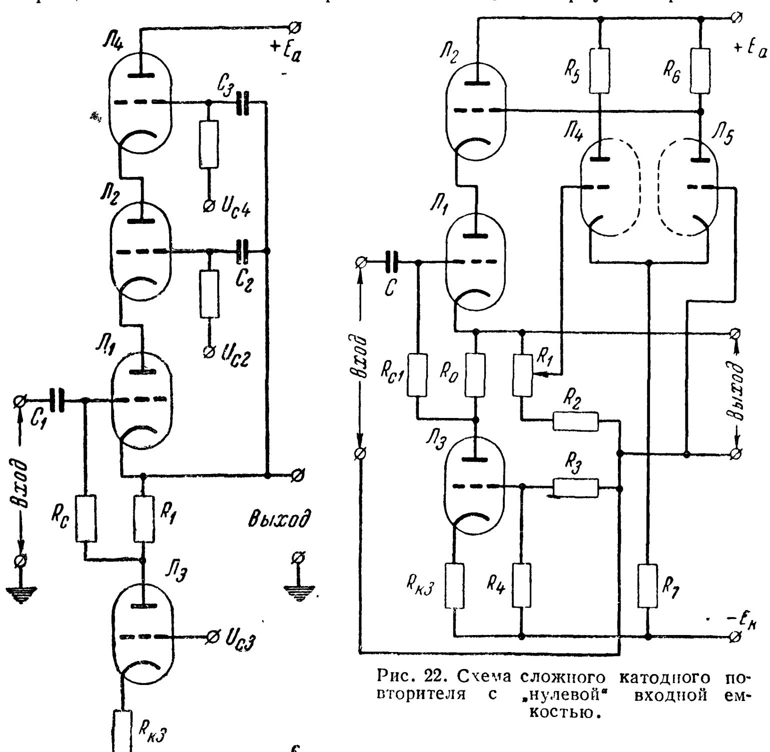


Рис. 21. Сложный катодный повторитель последовательного типа на триодах, предназначенный для передачи только переменных напряжений.

Рис. 22. Схема сложного катодного повторителя с „нулевой" входной емкостью.

связано с необходимостью увеличения $R_{к3}$, что возможно при подаче на управляющую сетку лампы $Л_3$ некоторого положительного напряжения, как это было показано на рис. 19.

В отдельных случаях в качестве катодной нагрузки лампы $Л_3$ можно использовать дополнительную лампу, причем сопротивление $R_{к3}$ вводится уже в катодную цепь этой лампы. Экивавалентное сопротивление катодной нагрузки лампы $Л_1$ для этого случая будет:

$$R'_{к1} = (1 + \mu_3) R_{i5} + (1 + \mu_3)(1 + \mu_5) R_{к3}, \quad (37)$$

где индексом 5 отмечены параметры этой дополнительной лампы.

Если сложный катодный повторитель предназначен для передачи только переменных напряжений, к величине его сеточного тока, а следовательно, и величине анодного тока предъявляются не слишком жесткие требования Ведь входная лампа работает на очень малом участке динамической характеристики и ее сеточный ток меняется незначительно даже при больших изменениях напряжения на входе Это означает что входное сопротивление лампы переменному току чрезвычайно велико и в расчет нужно брать лишь сопротивление утечки сетки Например, для повторителя по схеме, показанной на рис 21,

$$R_{д}=\frac{R_{с}}{1-K}, \tag{38}$$

где K определяется по формуле (36), поскольку $R_1 < R'_{к1}$

Подобное устройство может быть приспособлено и для передачи постоянных напряжений для чего сетки всех ламп, кроме $Л_1$ и $Л_3$, подключают, например, к делителю из неоновых ламп Этот делитель включают между источником анодного напряжения (через балластное сопротивление) и катодом лампы $Л_1$

Если на анод входной лампы $Л_1$ сложного катодного повторителя подать напряжение, которое по фазе совпадает с входным, а по амплитуде может превышать его (т е $K_{с\ a1}>1$), то, регулируя его амплитуду, можно входную емкость снизить до нуля Соответствующая схема показана на рис 22 Величину входной емкости устанавливают потенциометром R_1, от положения движка которого зависит доля выходного напряжения, подаваемого на управляющую сетку лампы $Л_3$ через балансный усилитель на лампах $Л_5$ и $Л_6$

При значении $K_{с\ а}$, чуть большем единицы, такое устройство склонно к самовозбуждению, а его динамический диапазон узок По этой причине сложные катодные повторители по указанной схеме не получили широкого распространения

Дрейф сложных катодных повторителей имеет порядок 0,1 *в/ч* (без учета дрейфа, обусловленного разрядом батареи накала лампы $Л_1$)

В сложных катодных повторителях с целью уменьшения выходной емкости рекомендуется для питания экранирующих сеток ламп применять отдельные трансформаторы (рис 20) Первичная обмотка такого трансформатора может питаться от 6 вольтовой обмотки силового трансформатора Каркас катушки следует изготовить так, чтобы вторичная обмотка отделялась от первичной и сердечника большими воздушными промежутками, в результате емкость вторичной обмотки на землю будет составлять всего несколько пикофарад Цепь питания экранирующей сетки должна располагаться в непосредственной близости к лампе

9. Сложные катодные повторители с усилением в цепи обратной связи

Рассмотренные выше сложные катодные повторители сохраняют и отдельные свойства простых катодных повторителей, которые в ряде применений могут рассматриваться как недостатки

Сюда относятся невозможность получить коэффициент передачи равным единице, относительно высокое (сотни и тысячи омов) вы-

ходное сопротивление, сдвиг уровней входного и выходного напряжений. Вводимое для устранения этого сдвига сопротивление (например, R_5 на рис. 20) еще более увеличивает выходное сопротивление повторителя.

Способы устранения этих недостатков можно уяснить путем следующих рассуждений.

Катодный повторитель — это усилительный каскад, который имеет коэффициент усиления $K_0=\mu R_к/R_i+R_к$ и охвачен 100-процентной отрицательной обратной связью. Поэтому коэффициент передачи катодного повторителя может быть записан в той же форме, что и для всякого усилителя с обратной связью:

$$K=\frac{K_0}{1+K_0\beta}, \qquad (39)$$

где β — коэффициент обратной связи, в данном случае равный 1.

Очевидно, что коэффициент передачи будет в точности равен единице в том случае, если

$$1=\frac{K_0}{1+K_0\beta'}, \quad \beta=\beta'=\frac{K_0-1}{K_0}. \qquad (40)$$

Когда K_0 достаточно велико, значение β' мало отличается от единицы и обратная связь остается практически 100-процентной со всеми вытекающими из этого преимуществами.

Выходное сопротивление катодного повторителя может быть выражено через K_0:

$$R_{вых}=\frac{R_к R_i}{(R_к+R_i)(1+K_0)}. \qquad (41)$$

Отсюда видно, что уменьшение $R_{вых}$ также достигается повышением K_0.

Однако один каскад не может обеспечить большого коэффициента усиления. Поэтому в цепь обратной связи вводят дополнительный каскад усиления. Подобная схема показана на рис. 23.

Рис. 23. Схема катодного повторителя с усилением в цепи обратной связи.

Левая половина лампы $Л_1$ представляет собой катодный повторитель, правая — усилительный каскад. Сигнал с левой половины на правую передается при помощи общего сопротивления $R_{к1}$ в цепи катода, которое служит и сопротивлением катодной нагрузки и сопротивлением связи. Лампу в таком включении называют обычно усилителем с катодной связью.

Входной сигнал изменяет потенциал катода лампы $Л_1$. Эти изменения усиливаются и через катодный повторитель на лампе $Л_2$

подаются на сетку правой половины лампы $Л_1$ в фазе с сигналом. Так как правая половина лампы $Л_1$ усиливает разность между выходным напряжением и напряжением на катоде лампы $Л_1$, то, очевидно, оба эти напряжения будут поддерживаться практически равными. В свою очередь напряжение на катоде лампы $Л_1$ приблизительно равно входному.

Правая половина лампы $Л_1$ не будет уменьшать коэффициент передачи входного катодного повторителя, потому что потенциал ее сетки меняется так же, как и потенциал катода, и, грубо говоря для входного катодного повторителя дело обстоит так, как если бы входной сигнал поступал на обе сетки лампы $Л_1$ одновременно.

Подавая на сетку правой половины лампы $Л_1$ лишь часть входного напряжения в соответствии с (40), можно коэффициент передачи всего устройства сделать точно равным единице и даже несколько бо́льшим. В показанной на рис 23 схеме при помощи сопротивления R_4 значение коэффициента передачи регулируется от 0,97 до 1,1 Значение коэффициента нетрудно довести до 10, мало затрагивая при этом другие параметры схемы.

Сдвиг выходного уровня устраняют подбором сопротивлений делителя R_1, R_2 и R_3 Регулирующим может быть любое из этих сопротивлений.

Выходное сопротивление устройства составляет несколько омов.

Рис. 21. Катодный повторитель с усилением в цепи обратной связи и вспомогательными цепями.

Главная петля обратной связи, замыкающаяся на сетку правой половины лампы $Л_1$, не улучшает характеристик входного катодного повторителя — его коэффициента передачи, входного сопротивления, максимально допустимую величину сигнала. Поэтому в схему вводят ряд дополнительных цепей и элементов, роль большинства которых была выяснена в предыдущем параграфе. С этими изменениями схема приобретает вид, показанный на рис. 24.

Чтобы делитель напряжения, связывающий лампы $Л_2$ и $Л_3$, не снижал коэффициента усиления в петле обратной связи, часть этого делителя, заключенная между анодной цепью лампы $Л_2$ и сеткой лампы $Л_3$ (сопротивление R_2 на рис 23) представляет собой один или несколько полупроводниковых диодов, включенных в запорном

направлении. В области пробойных напряжений величина падения напряжения на диоде мало зависит от протекающего через него тока, т. е. дифференциальное сопротивление диода в этой области сравнительно невелико. Если последовательно с диодом включено большое сопротивление, то диод при этом ведет себя в известной мере подобно стабиливольту.

Практически можно использовать почти любые типы диодов, более важно подобрать подходящий экземпляр. К примеру, отдельные экземпляры диодов типа Д2Ж показали дифференциальные сопротивления 75—100 *ком* при падении постоянного напряжения на них порядка 120 *в* и токах 150—300 *мка*. По температурной стабильности предпочтение следует отдавать кремниевым диодам.

В рассматриваемой схеме падение напряжения на этой части делителя имеет порядок 200 *в*.

Наличие в анодной цепи лампы $Л_2$ сопротивления R_6 обеспечивает подачу на сетку лампы $Л_4$ несколько большего напряжения, чем на сетку лампы $Л_3$. Подбирая величину этого сопротивления, можно коэффициент передачи от управляющей сетки входной лампы к ее аноду также сделать очень близким к единице. Однако получить этот коэффициент в точности равным единице нельзя из-за возникновения при этом неизбежной генерации.

Высокое входное сопротивление обусловливается работой входной лампы в режиме «плавающей» сетки. Режим устанавливается следующим образом. В готовом устройстве обрывается цепь управляющей сетки первой лампы и изменением величины сопротивления $R_{к3}$ добиваются нулевого потенциала катода лампы $Л_3$ (выходного зажима).

При наличии в схеме сопротивления R_6 вначале устанавливают его величину, а уже потом регулировкой сопротивления $R_{к3}$ добиваются того, чтобы нулевой потенциал выходного зажима соответствовал «плавающему» потенциалу сетки входной лампы.

Для сложного катодного повторителя, изображенного на рис. 25, величина сопротивления R_6 может лежать в пределах 40—70 *ком*, а сопротивления $R_{к3}$ — в пределах 20—40 *ком*. Выбор величины сопротивления R_3 определяется режимом работы диодов.

Входное сопротивление такого повторителя составляет приблизительно $5 \cdot 10^{11}$ *ом*, динамический диапазон ± 250 *в*, выходное сопротивление — около 3 *ом*.

Когда является достаточным значение $R_{вх} \approx 2 \cdot 10^{10}$ *ом*, сопротивление R_6 становится ненужным.

Полоса пропускания подобных катодных повторителей может быть доведена до 5—7 *Мгц*.

Глава четвертая

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ КОМПЕНСАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

10. Схемы с ручным уравновешиванием

Сущность компенсационного метода измерений заключается в том, что измеряемая э. д. с. уравновешивается падением напряжения, которое создается на калиброванном потенциометре изве-

стным током от постороннего источника. Момент равновесия определяется по отсутствию тока в указателе, обычно гальванометре. Очевидно, что при этом измеряемая э. д. с. равна компенсирующему напряжению, величина которого отсчитывается по положению движка или ручки потенциометра.

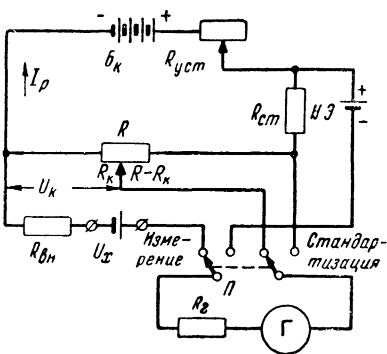


Рис. 25. Принципиальная схема компенсатора.

Достоинствами компенсационного метода являются его высокая точность и то обстоятельство, что в момент равновесия от источника измеряемой э. д. с. практически не потребляется мощности: вся мощность, расходуемая компенсатором, поставляется вспомогательной цепью.

Принципиальная схема компенсатора показана на рис. 25. Перед началом измерений устанавливают определенную величину рабочего тока $I_р$. Для этого переключатель *П* ставят в положение «Стандартизация» и при помощи установочного реостата $R_{уст}$ величину тока устанавливают такой, чтобы падение напряжения на эталонном сопротивлении $R_{ст}$ было равно величине э. д. с. нормального элемента *НЭ*, что определяется по отсутствию отклонения указателя гальванометра от нулевой отметки.

Затем переключатель переводят в положение «Измерение» и при помощи потенциометра *R* производят уравновешивание измерительной цепи. В положении равновесия, когда указатель гальванометра находится на нулевой отметке, имеют место соотношения:

$$U_x = I_р R_к; \; I_р R_{ст} = U_{н.э}, \tag{42}$$

из которых и получают выражение для измеряемого напряжения:

$$U_x = U_{н.э} \frac{R_к}{R_{ст}} . \tag{43}$$

Произведя отсчет положения движка потенциометра *R*, вновь переключают гальванометр в цепь контроля рабочего тока и убеждаются, что рабочий ток в течение процесса измерения был неизменным.

В связи с тем, что указатели равновесия имеют конечную чувствительность, момент равновесия невозможно установить абсолютно точно. Поэтому в действительности в определяемый нами момент равновесия через источник измеряемой э. д. с. и гальванометр протекает некоторый ток I_0, соответствующий отклонению указателя гальванометра на α_0 от нулевого положения. Для стрелочного прибора величину α_0 можно принять равной одной пятой деления шка-

лы Таким образом, входное сопротивление компенсатора в момент компенсации

$$R_{\text{вх}\,0}=\frac{U_x}{I_0}-R_{\text{вн}}=\frac{U_x}{\alpha_0}S_I-R_{\text{вн}},\qquad(44)$$

где $R_{\text{вн}}$ — внутреннее сопротивление источника, *ом*,

S_I — чувствительность гальванометра, делений на 1 *а*

Протекание в измерительной цепи тока I_0 приводит к возникновению погрешности измерения В момент отсчета

$$U_x-U_{\text{к}}=I_0(R_{\text{вн}}+R_{\text{г}}+R_{\text{к}})$$

и относительная погрешность измерения

$$\delta=\frac{U_x-U_{\text{к}}}{U_x}=\frac{I_0(R_{\text{вн}}+R_{\text{г}}+R_{\text{к}})}{U_x}=$$

$$=\frac{\alpha_0}{S_I}\,\frac{R_{\text{вп}}+R_{\text{г}}+R_{\text{к}}}{U_x}.\qquad(45)$$

К этои погрешности метода измерения добавляется еще погрешность отсчета $U_{\text{к}}$. Когда, например, в схеме отсутствует нормальный элемент и величина $U_{\text{к}}$ измеряется вольтметром, дополнительная погрешность определяется классом точности последнего.

Из выражений для входного сопротивления и погрешности измерения следует, что чувствительность указателя положения равновесия должна быть возможно большей. Для повышения чувствительности указателя часто применяют усилители малых токов с непосредственным усилением или с преобразованием сигнала в переменный ток Очень удобны для этих целей усилители на транзисторах.

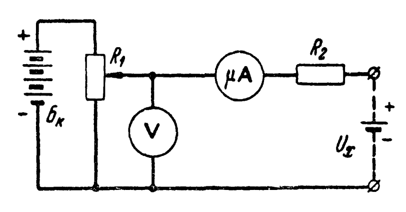


Рис 26 Простейшая компенсационная схема

При измерениях напряжений компенсационным методом в любительских условиях основная схема компенсатора может подвергаться различным упрощениям. Но формулы (44) и (45) остаются справедливыми и с их помощью могут быть определены возможности любого компенсатора.

На рис. 26 показана простейшая схема измерения напряжений компенсационным методом. Указателем равновесия служит стрелочный микроамперметр, а значение компенсирующего напряжения отсчитывается по вольтметру. Сопротивление R_2 ограничивает потребление тока от источника измеряемого напряжения в моменты, далекие от состояния равновесия.

В подобной схеме можно обойтись только микроамперметром (рис. 27) Когда переключатель находится в положении «Компенсация», микроамперметр служит указателем равновесия, а при переводе переключателя в положение «Отсчет» микроамперметр вместе

с добавочным сопротивлением $R_п$ образует вольтметр, по которому определяется значение компенсирующего напряжения.

Чтобы сопротивление потенциометра R_1 между его движком и «землей» не зависело от того, какую в данный момент роль выполняет микроамперметр, к движку потенциометра при разрыве цепи вольтметра подключается эквивалентное последнему сопротивление $R_{зам}$ Величины сопротивлений определяются по формулам:

$$R_п = \frac{E_Б}{I_м} - R_м; \; R_{зам} = \frac{E_Б}{I_м}, \qquad (46)$$

где $I_м$ — ток полного отклонения микроамперметра, *а*;

$R_м$ — внутреннее сопротивление микроамперметра, *ом*.

Если сопротивление потенциометра много меньше $R_{зам}$ (в сотни раз), то последнее можно опустить.

На рис. 28 изображена схема еще одного компенсатора, который может быть изготовлен при наличии хорошего проволочного потенциометра, обозначенного на схеме R_1.

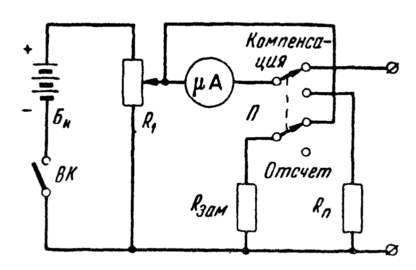


Рис. 27. Простейшая компенсационная схема с одним показывающим прибором.

По делителю напряжения, образованному сопротивлениями R_3—R_{10} и потенциометром R_1, протекает рабочий ток $I_р$ от внутренней или внешней батареи. Сопротивления делителя должны удовлетворять условиям: $R_3=R_7$; $R_4=R_8$; $R_5=R_9$; $R_6=R_{10}$. Обычно все сопротивления выбираются одинаковыми.

При помощи переключателя $П_2$ сопротивления делителя переключаются с одной стороны потенциометра R_1 на другую. При этом суммарное сопротивление делителя, а следовательно, и рабочий ток остаются неизменными. Поэтому компенсатор имеет одну шкалу

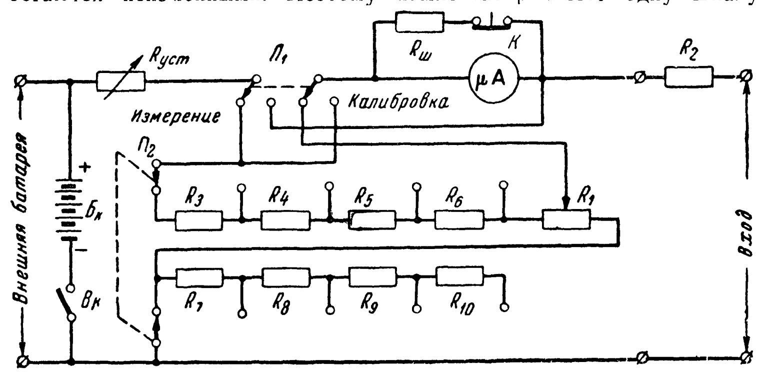


Рис. 28. Схема компенсатора с отсчетом по углу поворота движка потенциометра.

$0—I_pR_1$ *в*, а пределы измерения зависят от положения переключателя $П_2$ и равны $0—I_pR_1$; $R_7—I_p(R_7+R_1)$; $I_p(R_7+R_8)\div I_p(R_7+R_8+$ $+R_1)$; $I_p(R_7+R_8+R_9)—I_p(R_7+R_8+R_9+R_1)$; $I_p(R_7+R_8+R_9+R_{10})—$ $—I_p(R_7+R_8+R_9+R_{10}+R_1)$.

Переключателем $П_2$ компенсирующее напряжение устанавливают грубо, а потенциометром R_1 — точно. Для отсчета измеряемого напряжения к нижнему значению соответствующего предела измерения прибавляют отсчет по шкале потенциометра.

Параллельно микроамперметру подключают шунт такой величины, что току I_p соответствует полное отклонение стрелки микроамперметра. Тем самым при контроле рабочего тока (переключатель $П_1$ в положении «Калибровка») микроамперметр вносит наименьшую погрешность. Шунт остается подключенным также при грубой установке компенсирующего напряжения, и лишь точная установка положения равновесия производится при отжатой кнопке *К*.

Произведем расчет подобного компенсатора Предположим, что имеется потенциометр на 100 *ком*, а максимальное значение измеряемого напряжения 200 *в*.

Примем пять пределов измерения. Так как пределы должны перекрываться, сопротивления делителя должны быть несколько меньшей величины, чем величина потенциометра, например 91 *ком*. Тогда полное сопротивление делителя будет $4\cdot91+100=464$ *ком*. Рабочий ток установим 500 *мка*; при этом верхний предел измерения составит $464\cdot0{,}5=232$ *в* Падение напряжения на потенциометре равно $100\cdot0{,}5=50$ *в*. Это будет шкала компенсатора. Нижние значения пределов измерения равны: $91\cdot0{,}5=45{,}5$ *в*; $91\cdot2\cdot0{,}5=91$ *в*; $91\cdot3\cdot0{,}5=136{,}5$ *в*; $91\cdot4\cdot0{,}5=182$ *в*. К одному из этих значений в зависимости от положения переключателя $П_2$ и прибавляют отсчет по 50-вольтовой шкале потенциометра. Таким образом, пределы измерений будут. 0—50; 45,5—95,5; 91—141; 135,5—185,5 и 182—232 *в*.

Источником питания может быть батарея ГБ-300 или две последовательно соединенные батареи БАС-Г-160, или какие-либо подобные им. Если принять величину начальной э. д. с. равной 320 *в*, то на сопротивлении $R_{уст}$ должно при свежих батареях падать $320—$ $—232=88$ *в*, для чего величина $R_{уст}$ должна быть не менее $88/0{,}5=$ $=176$ *ком*. Выбираем ближайшее большее по стандарту: 220 *ком*.

Микроамперметр можно применить типа М-494 со шкалой 50—0—50 *мка* Величина сопротивления $R_ш$ подбирается в зависимости от сопротивления рамки микроамперметра. Если использовать прибор со шкалой 500—0—500 *мка*, то сопротивление $R_ш$ и кнопка *К* будут не нужны. Однако входное сопротивление и точность компенсатора при этом уменьшатся.

Наименьшая величина ограничительного сопротивления R_2 определяется из тех соображений, что при подаче наибольшего входного напряжения на компенсатор, включенный для измерения на низшем пределе измерения, стрелка микроамперметра не должна уходить за шкалу Поэтому $R_2\geqslant232/0{,}5=464$ *ком*.

Указанный компенсатор пригоден для измерения и переменных напряжений, для чего последовательно с сопротивлением R_2 включают полупроводниковый диод. В этом случае уравновешивают постоянную составляющую выпрямленного напряжения, которая при однополупериодном выпрямлении равна $U_{ампл}/\pi$ или $\sqrt{2}/\pi\cdot U_{эфф}$. Поэтому шкала

для эффективных значений переменного напряжения уменьшена относительно шкалы постоянных напряжений в $\pi/\sqrt{2}=2,22$ раза.

При измерениях э. д с. источников с очень высокими внутренними сопротивлениями погрешности измерений могут быть весьма значительными, как это следует из формулы (45). Возникновение погрешностей связано с протеканием через измерительную цепь в момент отсчета некоторого тока I_0. При измерениях же по компенсационной схеме интегрирующего типа (рис. 29) это обстоятельство исключается. Отличие процесса измерения по этой схеме состоит лишь в способе определения положения равновесия.

Процесс измерения протекает следующим образом При разомкнутом выключателе *Вк* вводят некоторое компенсирующее напряжение $U_к$ и замечают его величину по вольтметру *V*. Спустя время $t \approx 5RC$ конденсатор *C* окажется заряженным до напряжения $U_с$, равного разности измеряемого и компенсирующего напряжений: $U_с=U—U_к$. Заряд конденсатора будет $Q=C(U—U_к)$. Знак заряда зависит от того, какое из напряжений больше.

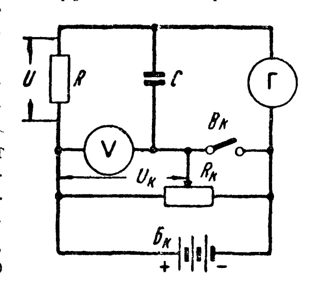


Рис. 29. Компенсационная схема интегрирующего типа.

При замыкании выключателя конденсатор разрядится через баллистический гальванометр *Г*. Отклонение светового пятна гальваномтера составит $\alpha_m=S_Q C(U—U_к)$ делений, где S_Q — баллистическая чувствительность гальванометра. Желательно первоначальную величину $U_к$ подобрать такой, чтобы указатель отклонялся примерно на всю шкалу.

Затем выключатель снова размыкают и устанавливают новое значение $U_к$, при котором отклонение указателя гальванометра уменьшится. Так проделывают несколько раз, доводя величину $U_к$ до такого значения, при котором указатель будет отклоняться примерно на всю шкалу, но в другую, чем первоначально, сторону.

По полученным результатам строят зависимость α_m от $U_к$. Она представляет собой прямую линию Точка пересечения этой прямой с горизонтальной осью ($\alpha_m=0$) соответствует равенству напряжений $U_к=U$.

Описанный способ особенно пригоден для измерения малых напряжений, потому что при длительном процессе накопления заряда на емкости устраняются флуктуации напряжения и их влияние на результат измерения.

Подобный способ измерения позволяет обнаружить мощность до $10^{-15}—10^{-16}$ *вт*. При внутреннем сопротивлении источника измеряемого напряжения порядка 10^8 *ом* это соответствует напряжению 0,1 *мв*, если принять емкость конденсатора *C* равной 2 *мф*.

С увеличением емкости конденсатора чувствительность схемы повышается, но одновременно с этим увеличивается и время, необходимое для полного заряда конденсатора. Практические соображения ограничивают это время 2—3 *мин*.

Для повышения входного сопротивления компенсационных схем в них используют электрончые лампы. Упрощенная схема лампового

компенсационного вольтметра изображена на рис 30. Обычно лампа работает в режиме «плавающей» сетки, что обеспечивается выбором соответствующей величины сопротивления $R_{см}$.

Входной сигнал изменяет величину анодного тока лампы. Перемещая движок потенциометра R_1, значение анодного тока возвращают к первоначальному, что фиксируется либо по микроамперметру, включаемому в анодную цепь лампы, либо по вольтметру, измеряющему напряжение на анодном сопротивлении R_a. При этом напряжение $U_к$ на потенциометре R_1 равно измеряемому напряжению и его величина прочитывается на шкале вольтметра V.

Иногда возникает необходимость снять с большой точностью характеристику какого-либо устройства с высоким внутренним сопротивлением В этих случаях, если нет специальных измерительных приборов, удобен метод измерения с частичной компенсацией измеряемого напряжения. Схема измерения изображена на рис. 31. В нее

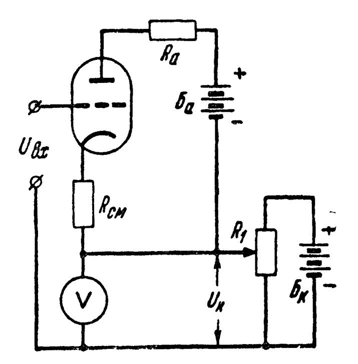


Рис. 30. Ламповая компенсационная схема с ручным уравновешиванием.

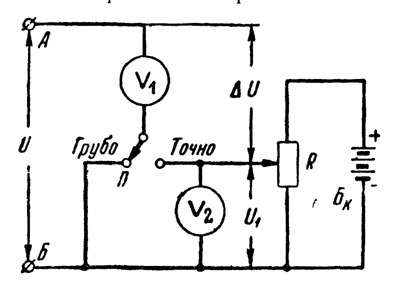


Рис. 31. Схема измерения напряжения с частичной компенсацией.

входят. ламповый вольтметр V_1 обычной точности, низкоомный лабораторный вольтметр V_2 класса 0,2 или 0,5 и регулируемый источник постоянного напряжения — батарея или стабилизированный выпрямитель. Входное сопротивление устройства по этой схеме оказывается в десятки раз выше, чем входное сопротивление лампового вольтметра, а погрешность измерения всего лишь в 2 раза больше, чем у используемого лабораторного вольтметра.

Измеряемое напряжение U подключают к зажимам $А$ и $Б$ и переключатель $П$ устанавливают в положение «Грубо». При этом ламповый вольтметр покажет полную величину U. Это показание округляют в бо́льшую или меньшую сторону до значения U_1, которое удобно было бы отсчитывать по шкале лабораторного вольтметра, и устанавливают это напряжение на потенциометре R. Затем переключатель переводят в положение «Точно», а ламповый вольтметр переключают на наименьший предел измерения.

Теперь к ламповому вольтметру приложено лишь небольшое напряжение ΔU, являющееся разностью между значением U_1 и измеряемым напряжением U, так что $U = U_1 + \Delta U$.

Абсолютная погрешность измерения будет равна сумме абсолютных погрешностей обоих вольтметров. Абсолютная погрешность измерения лабораторным вольтметром определяется в соответствии

с его классом точности. Погрешность лампового вольтметра по абсолютной величине оказывается очень небольшой, поскольку измерения проводятся на его самой чувствительной шкале. Поэтому полная относительная погрешность измерения напряжения U оказывается того же порядка, что и при измерении одним лабораторным вольтметром.

Для входного сопротивления устройства, обозначив входное сопротивление лампового вольтметра через R_c, можем написать:

$$R_{вх}=\frac{U}{I}=\frac{UR_c}{\Delta U}=\frac{U_1+\Delta U}{\Delta U}R_c=\left(1+\frac{U_1}{\Delta U}\right)R_c. \qquad (46)$$

Поясним сказанное примером. Пусть ламповый вольтметр имеет $R_c=11$ *Мом* и максимальную погрешность $\pm5\%$ верхнего значения шкалы, а в качестве лабораторного вольтметра используется прибор класса 0,2, например М106/1. В положении «Грубо» ламповый вольтметр на шкале 30 *в* показывает 20,2 *в*. Это напряжение показывается с точностью $\pm30\cdot5/100=1,5$ *в*. С помощью потенциометра R устанавливаем на 30-вольтовой шкале лабораторного вольтметра округленное значение $U_1=20$ *в*. С переводом переключателя в положение «Точно» переключим ламповый вольтметр на шкалу 1 *в*. Пусть он покажет на этой шкале 0,7 *в*. Таким образом, измеряемое напряжение $U=20+0,7=20,7$ *в*. При этом абсолютная погрешность показаний лабораторного вольтметра $\pm30\cdot0,2/100=0,06$ *в*. Абсолютная погрешность показаний лампового вольтметра $\pm1\cdot5/100=0,05$ *в*; полная абсолютная погрешность измерения $0,06+0,05=0,11$ *в* (вместо 1,5 *в*!); относительная погрешность измерения $0,11\cdot100/20,7=0,54\%$.

Входное сопротивление устройства

$$R_{вх}=\left(1+\frac{20}{0,7}\right)\cdot11\approx326 \text{ Мом}.$$

При снятии характеристик величину U_1 обычно не нужно менять для целой серии точек и остается лишь отсчитывать значения ΔU по ламповому вольтметру.

11. Схемы с автоматическим уравновешиванием

Измерение меняющихся напряжений при помощи компенсационных схем весьма затруднительно. Кроме того, процесс измерений требует значительной затраты времени, входное сопротивление схем в неуравновешенном положении сравнительно невелико, отсчет напряжений довольно неудобен.

Эти недостатки устраняются автоматизацией процесса уравновешивания. Схемы, в которых уравновешивание осуществляется автоматически, называются автокомпенсационными, а устройства по таким схемам — автокомпенсаторами.

Автоматизация может быть осуществлена различными способами. В простейшем случае разность $U-U_к$ между измеряемым и компенсирующим напряжениями подают через усилитель на электродвигатель. С ротором электродвигателя кинематически соединяют движок потенциометра, с которого снимается компенсирующее на-

пряжение. В зависимости от знака разности $U—U_к$ двигатель перемещает движок потенциометра в нужную сторону до тех пор, пока компенсирующее напряжение сравняется с измеряемым. Одновременно двигатель перемещает и указатель.

Компенсаторы такого типа сложны, и о самостоятельном их изготовлении не может быть речи. Эти компенсаторы имеют еще и тот недостаток, что из-за инерции механически движущихся частей их частотная характеристика ограничена несколькими герцами.

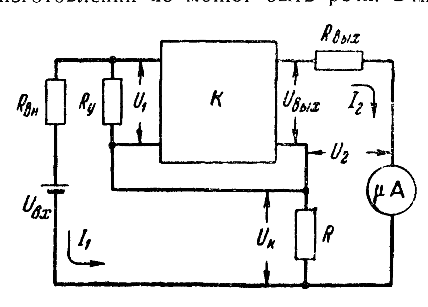


Рис. 32. Схема автокомпенсатора с обратной связью по току.

Для измерений в высокоомных цепях наиболее приемлемы автокомпенсационные схемы, базирующиеся на основе схемы усилителя, охваченного 100-процентной отрицательной обратной связью. Преимущественно распространены схемы с обратной связью по току.

Принципиальная схема автокомпенсатора с обратной связью по току показана на рис. 32. Измеряемая э. д. с уравновешивается падением напряжения на сопротивлении R, которое создается выходным током I_2 усилителя с коэффициентом усиления K. На входе усилителя действует напряжение U_1, равное разности измеряемого и компенсирующего напряжений.

Если коэффициент усиления достаточно велик, в измерительной цепи устанавливается состояние, очень близкое к полной компенсации, и $U_к=U_{вх}$. В свою очередь $U_{вых}\approx U_к$.

Для выходного напряжения усилителя можно написать:

$$U_{вых}=(R_{вых}+R)I_2=(U_{вх}-U_к)\beta_1 K, \qquad (47)$$

где

$$\beta_1=\frac{R_у}{R_у+R_{вн}+R} \qquad (48$$

Отсюда выходной ток

$$I_2=\frac{U_{вх}}{R\left(1+\frac{1}{\beta_1 K}\right)+\frac{R_{вых}}{\beta_1 K}}\approx\frac{U_{вх}}{R} \qquad (49$$

При большой величине $\beta_1 K$ и стабильном сопротивлении R ток в измерителе не зависит от параметров автокомпенсатора и измеритель может быть проградуирован в вольтах.

Следует заметить, что, вообще говоря, всякий катодный повторитель может рассматриваться как автокомпенсатор. Катодный повторитель развивался как согласующий элемент — «трансформатор сопротивлений» — большей частью в импульсных устройствах, в то время как автокомпенсатор развивался как сугубо измерительное устройство.

Из формулы (49) следует, что пределы измерения автокомпенсатора можно менять изменением величины сопротивления R обратной связи или изменением чувствительности измерителя.

Чтобы определить входное сопротивление, подставим в формулу (44) значение входного тока

$$I_1 = I_0 = \frac{U_{вх} - U_к}{R_у + R_{вн} + R}. \qquad (50)$$

Заменив $U_к$ на I_2R, причем I_2 берется из (49), после преобразований получим:

$$R_{вх} = R + R_у + \frac{RR_уK}{R + R_{вых}} \approx R_у(1 + K), \qquad (51)$$

потому что обычно $R \ll R_у$, а $R_{вых} \ll R$.

В автокомпенсационных схемах благоприятны условия работы входной лампы в режиме «плавающей» сетки. Разность потенциалов между сеткой и катодом входной лампы благодаря наличию сильной отрицательной обратной связи почти не меняется. Следовательно, точка «плавающего» потенциала сдвигается только за счет изменения анодного напряжения. При небольших величинах измеряемых напряжений сеточный ток, возникающий вследствие этого сдвига, имеет малые значения. Когда же величины измеряемых напряжений значительны, предусматривается дополнительная цепь для подачи на анод входной лампы напряжения, примерно равного входному (гл. 3).

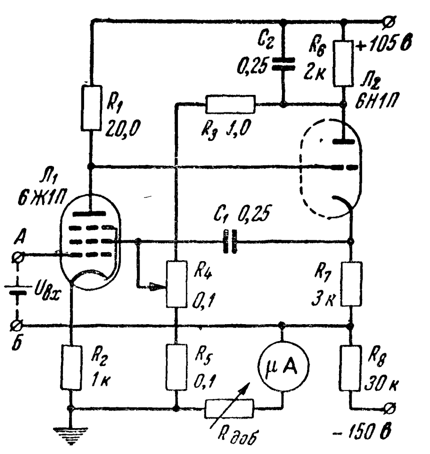


Рис. 33. Автокомпенсационная схема для измерения малых токов.

На рис. 33 показана простая схема для измерения напряжений до 2 *в*. Напряжение обратной связи вводится в цепь сетки. Лампа $Л_1$ работает при низких анодном и экранном напряжениях. В таком режиме («микротоковом» или «голодающем») каскад может иметь коэффициент усиления до 1 000, причем значение коэффициента усиления возможно увеличить еще в 3 раза при помощи внутренней положительной обратной связи, напряжение которой подается на экранирующую сетку лампы $Л_1$ с небольшого сопротивления, включенного в анодную цепь лампы $Л_2$. Смещение на управляющей сетке $Л_1$, соответствующее точке плавающего потенциала при данных анодном и экранном напряжениях, обеспечивается выбором сопротивления R_2.

Из схемы видно, что ни один полюс источника измеряемого напряжения не может быть соединен с «землей». Поэтому подобные

схемы применяют преимущественно для измерения малых токов. Источник тока подключают между входным зажимом *А* и «землей», а между зажимами *А* и *Б* включают высокоомное сопротивление. Создаваемое на нем измеряемым током падение напряжения эквивалентно источнику напряжения, подключенному к входным зажимам, как это показано на схеме

Выходное сопротивление примерно равно величине сопротивления R_7 Это сопротивление нужно для того, чтобы при отсутствии сигнала зажим *Б* имел потенциал «земли» Установка «нуля» может производиться при помощи сопротивления R_4 или R_7

На рис 34 представлена схема автокомпенсатора, являющаяся развитием ламповой компенсационной схемы с ручным уравновеши-

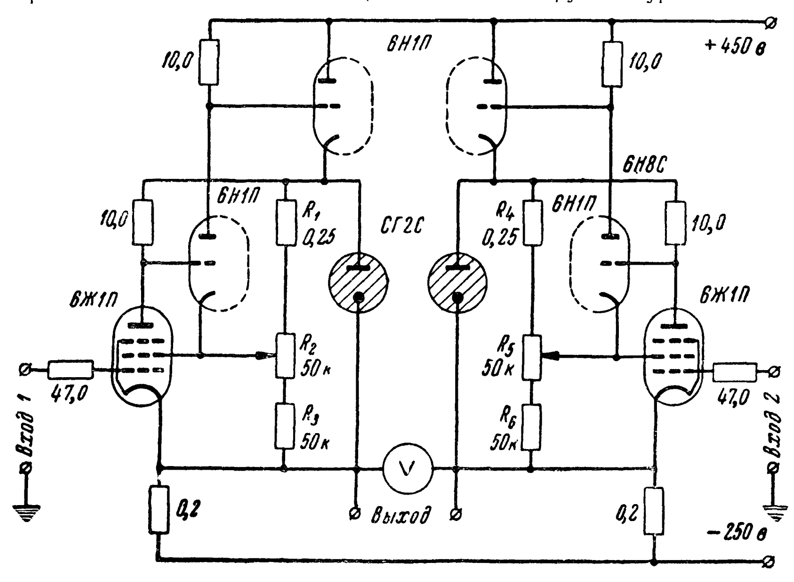


Рис. 34. Схема дифференциального автокомпенсационного вольтметра.

ванием (рис 30) Автокомпенсатор выполнен в виде дифференциального вольтметра; это делает его более удобным и более стабильным. Когда используется лишь один вход, второй замыкают на землю

Режимы «плавающих» сеток устанавливают регулировкой экранных напряжений входных ламп при помощи потенциометров R_2 и R_5 Момент достижения режима «плавающей» сетки определяется тем, что замыкание сетки на землю не меняет потенциала выходного зажима Для более точной проверки между управляющей сеткой и землей включают конденсатор небольшой емкости с хорошей изоляцией Если «плавающий» потенциал сетки установлен точно, после подключения конденсатора выходное напряжение не будет «ползти».

Сопротивления R_1, R_3, R_4, R_6 желательно брать проволочные.

Пределы измерения от —150 до +300 *в*.

Глава пятая

ВОЛЬТМЕТРЫ С ЛАМПАМИ В ОБРАЩЕННОМ РЕЖИМЕ

Вольтметр с высоким входным сопротивлением и большим верхним пределом измерения можно получить при использовании так называемого обращенного режима работы лампы, когда роль входного электрода играет анод, а выходного — управляющая или иная сетка. На эту сетку подают некоторое положительное напряжение; в ее цепи протекает ток, величина которого управляется отрицательным потенциалом анода.

Таким образом, семейству анодных характеристик лампы при обычном включении соответствует в обращенном режиме семейство

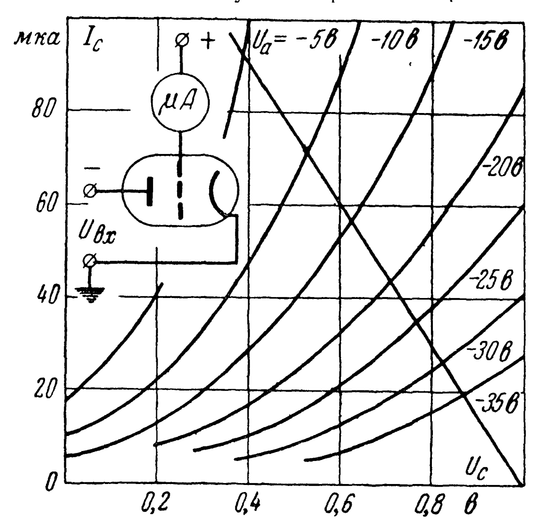


Рис. 35. Характеристики триода 6С3Б в обращенном режиме. Проведена линия нагрузки для сопротивления в цепи сетки 5,6 *ком.*

зависимостей тока сетки от напряжения на ней при напряжении анода, принятом за параметр. Такие зависимости для триода 6С3Б представлены на рис. 35.

В обращенном режиме обычная лампа приобретает многие свойства электрометрической. В самом деле, анод лампы находится под значительным отрицательным потенциалом, и поэтому электронная составляющая входного тока отсутствует. От излучений катода анод защищен сеткой, да и находится он от катода на значительном расстоянии. Для устранения ионного тока потенциал сетки устанавливают ниже потенциала возбуждения. Следовательно, входной ток определяется только токами утечки по изоляции и баллону лампы.

Вместе с тем допустимые пределы изменения потенциала управляющего электрода лампы в обращенном режиме гораздо больше,

чем у лампы в обычном включении, так как управляющее действие анода на катодный ток слабее, чем сетки. В этом преимущество ламп в обращенном режиме перед электрометрическими лампами.

Суммарное действие напряжений анода и сетки на сеточный ток I_c эквивалентно действию на него так называемого действующего напряжения $U_д$, приложенного только к сетке и равного:

$$U_д = U_{с.к} + DU_{а к}, \qquad (52)$$

где $D=1/\mu$ — проницаемость лампы, которая принимается не зависящей от режима (это предположение близко к действительности).

Поскольку измеряемое напряжение прикладывается к аноду в отрицательной полярности, значение его в эту и последующие формулы должно подставляться с минусом.

При положительных значениях $U_д$, когда отрицательное напряжение на аноде невелико, сеточный ток подчиняется закону «трех вторых»:

$$I_с = A\,(U_{с.к} + DU_{а к})^{3/2}, \qquad (53)$$

где A — коэффициент пропорциональности.

Когда отрицательное напряжение на аноде увеличивается настолько, что действующее напряжение становится отрицательным, ток сетки описывается выражением, подобным выражению для анодного тока диода в области отрицательных значений потенциала его анода:

$$I_с = I_{с0} e^{\frac{U_{с к} + DU_{а.к}}{kT} q}, \qquad (54)$$

где $I_{с0}$ — ток сетки при $U_{с.к} = U_{а.к} = 0$;

q — заряд электрона, равный $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *к*;

k — постоянная Больцмана, равная $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ *дж/град*;

T — абсолютная температура катода, °K.

Отсюда, в частности, следует, что характеристики лампы в обращенном режиме сильно зависят от температуры катода и — в несколько меньшей степени — от напряжения источника питания сетки, поэтому стабилизации питающих напряжений должно быть уделено серьезное внимание.

Характеристики лампы в обращенном режиме нелинейны, как нелинейны характеристики лампы и в обычном включении. Это видно из рис. 35, а также следует из формул (53) и (54). Особенно велика нелинейность на участках, соответствующих $U_д>0$. Поэтому эти участки из работы исключают, например подавая на катод лампы постоянное положительное напряжение 20—50 *в*.

Когда измеряются переменные напряжения, на катод должно быть дополнительно подано постоянное положительное напряжение (смещение), равное амплитудному значению измеряемого напряжения.

Дальнейшая линеаризация характеристик осуществляется включением в цепь сетки, являющейся теперь выходным электродом, сопротивления $R_с$. При этом для сохранения режима работы лампы напряжение источника питания должно быть соответственно увеличено. Действие вводимой таким образом отрицательной обратной связи тем эффективнее, чем величина сопротивления $R_с$ больше.

Для примера на рис 36 показана динамическая характеристика лампы 6С3Б при $R_c=250$ *ком* и напряжении питания сетки 35 *в*. Нелинейность заметна лишь на небольшом начальном участке.

Для расширения пределов измерения нужно увеличивать сопротивление R_c и напряжение источника питания цепи сетки. Однако при этом следует иметь в виду, что при увеличении отрицательного напряжения на аноде напряжение сетка — катод может превысить потенциал ионизации остаточных молекул газа в лампе и это явится причиной появления ионного входного тока. Правда, благодаря тому, что ток сетки составляет всего несколько десятков микроампер и напряжение $U_{c\,к}$ в любом случае будет не больше 15—20 *в* (так как бо́льшие значения соответствуют уже опасным для лампы анодным напряжениям), этот ионный ток будет не очень значительным. Ориентировочная величина входного сопротивления для этого случая составляет 10^{11} *ом*.

Для измерения больших напряжений должны в первую очередь выбираться лампы с большой величиной μ.

В вольтметрах с лампами в обращенном режиме о значении измеряемого напряжения удобнее судить не по величине тока сетки I_c, а по величине падения напряжения, создаваемого этим током на сопротивлении R_c. Кроме того, из-за высокого выходного сопротивления каскада на лампе в обращенном режиме сигнал с ее сетки следует снимать через катодный повторитель или усилительный каскад в зависимости от типа лампы и предела измерения.

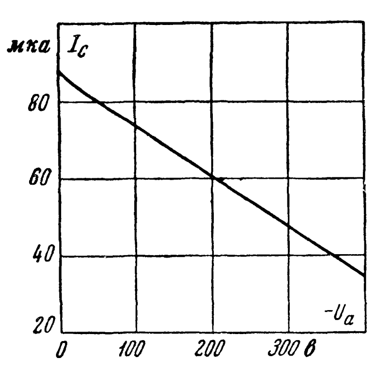


Рис. 36. Динамическая характеристика каскада на лампе 6С3Б в обращенном режиме.

Напряжение питания сетки 35 *в*, сопротивление в цепи сетки 250 *ком*.

На рис. 37 представлена схема вольтметра на лампе 6С3Б в обращенном режиме. На рис. 36 была показана динамическая характеристика входного каскада этого вольтметра.

Вольтметр измеряет напряжения отрицательной полярности. Для исключения начального нелинейного участка характеристики на катод лампы $Л_1$ подано с делителя положительное напряжение 40 *в*.

Основной предел измерения (сигнал снимается со всего сопротивления R_c) составляет 0—100 *в* Нелинейность шкалы 0,6%. Входное сопротивление составляет около $8 \cdot 10^{13}$ *ом* и определяется сопротивлением утечек.

Изменение напряжения на сетке лампы $Л_1$ от 42,1 до 45,3 *в*. По формуле (6) с учетом чувствительности микроамперметра и его внутреннего сопротивления рассчитывают величину сопротивления $R_м$, необходимую для обеспечения полного отклонения стрелки микроамперметра.

Сигнал в 3,2 *в* достаточно велик, чтобы позволить простым переключением сопротивления $R_м$ в соответствии с формулой (6) получить шкалу 0—30 *в*.

Снимая сигнал с части сопротивления R_c, пределы измерения можно расширить В рассматриваемом вольтметре таким образом получена шкала 0—300 *в*, нелинейность ее 1,1% Одновременно с переключением шкалы потенциал сетки лампы $Л_3$ соответственно меняют при помощи того же переключателя $П$ (для неизменности положения «нуля» показывающего прибора) Наибольший входной ток при измерениях на шкале 0—300 *в* составляет около $0{,}8 \cdot 10^{-10}$ *а*

Таким образом, вольтметр имеет три шкалы 0—30, 0—100 и 0–300 *в*

Для получения более чувствительных шкал следующий за лампой $Л_1$ каскад должен быть усилителем напряжения Его собственный дрейф и дрейф, обусловленный изменениями напряжения накала лампы $Л_1$, служат основным препятствием для значительного повышения чувствительности вольтметра

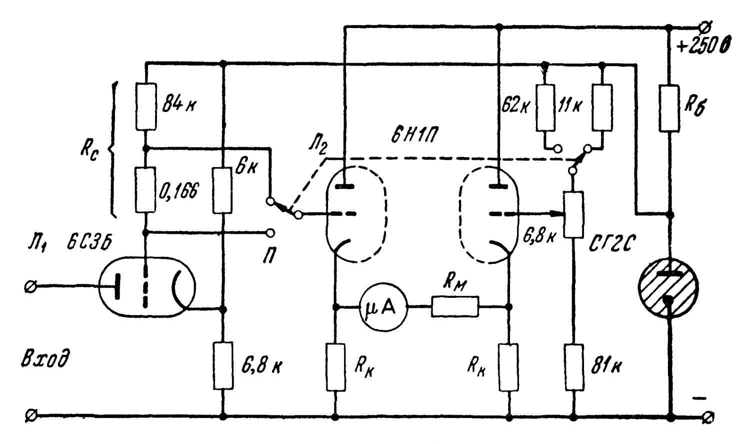


Рис 37 Вольтметр на триоде в обращенном режиме.

Влияние изменений напряжения накала лампы $Л_1$ может быть в значительной мере компенсировано Для этого собирают второй каскад на лампе 6С3Б, совершенно аналогичный первому на лампе $Л_1$, и таким же образом связывают его с правой половиной лампы $Л_2$ Другими словами, изготавливают дифференциальный вольтметр, один из входов которого при обычном применении заземляется

Экземпляры ламп подбирают, меняя для каждой пары напряжение накала и наблюдая за положением «нуля» показывающего прибора

Верхний предел измерения определяется наибольшим допустимым напряжением на аноде Поэтому, используя лампы с отдельным выводом анода, можно предел измерения довести до нескольких киловольт

Хорошие результаты получаются при использовании в обращенном режиме лампы 6Ж1Ж Меняя назначение электродов и устанавливая на них соответствующие потенциалы, можно получать различные пределы измерения при хорошей линейности шкалы При изме-

рении малых напряжений в качестве выходного электрода используют третью сетку, проницаемость которой высока, а при измерении больших напряжений — вторую.

В последнем случае для линеаризации характеристики на третью сетку подают отрицательное напряжение порядка 50 *в*. Напряжение на первой сетке должно быть порядка 1,5—2 *в*, а на второй 2—4 *в*.

Схема подобного вольтметра показана на рис. 38. Вольтметр имеет шкалу 0—200 *в*; нелинейность шкалы менее 1%. Наибольший входной ток $1{,}1 \cdot 10^{-11}$ *а* (при $U_{вх} = -200$ *в*). В основном это ионный ток, обусловленный тем, что напряжение между второй сеткой и катодом превышает потенциал ионизации.

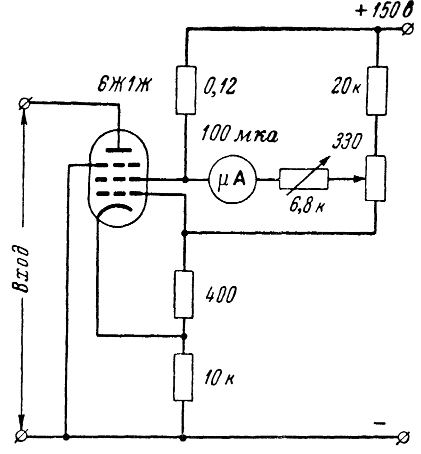


Рис. 38. Вольтметр на пентоде в обращенном режиме.

Выбор несколько повышенного напряжения объясняется желанием получить максимальную простоту схемы (при этом не требуется дополнительного лампового каскада).

Напряжение накала 4 *в*.

С лампой 6Ж1Ж не составляет особого труда получить входные сопротивления 10^{15}—10^{16} *ом*.

Глава шестая

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКООМНЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Высокоомные вольтметры могут быть использованы для измерения различных электрических и неэлектрических величин, преобразованных в пропорциональное им напряжение.

Некоторые измерительные схемы представлены на рис. 39.

Схема на рис. 39,*а* используется для измерения малых токов. Протекая через большое сопротивление R известной величины, измеряемый ток создает падение напряжения, которое измеряет вольтметр. Это основная схема измерения токов ионизационных камер, фотоэлементов и других источников с высоким внутренним сопротивлением. Последнее должно быть по крайней мере в 100 раз больше сопротивления R. Верхняя граница частотной характеристики устройства (при спаде 3 *дб*) равна $f_в = \frac{1}{2\pi RC}$, где C — входная емкость вольтметра и емкость монтажа.

Измерение электрических зарядов производится по схеме, изображенной на рис. 39,*б* По этой же схеме можно измерять малые постоянные токи. Конденсатор *C* должен быть небольшой емкости, с высоким сопротивлением изоляции. При измерении тока должно выполняться соотношение $t \ll R_{вх}C$, где t — время измерения. Чем

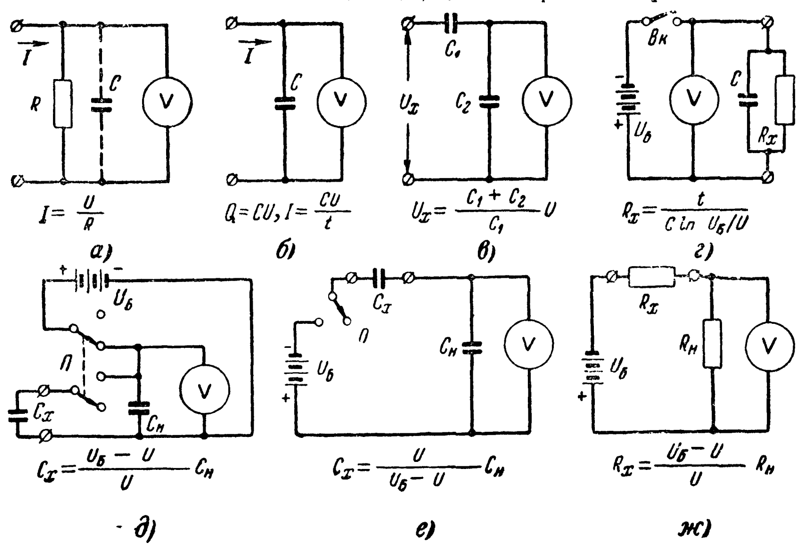


Рис 39. Схемы измерения некоторых электрических величин вольтметром с высоким входным сопротивлением.

больше допустимое время измерения, тем меньший ток может быть измерен

На рис 39,*в* приведена принципиальная схема киловольтметра с емкостным делителем, пригодного для измерения напряжений в рентгеновских аппаратах, распределения напряжений на изоляторах и т п Время измерения должно быть много меньше постоянных времени саморазряда конденсаторов

$$R_{ут1}C_1 \text{ и } \frac{R_{ут2}R_{вх}}{R_{ут2} + R_{вх}} C_2,$$

где $R_{ут1}$ и $R_{ут2}$ — сопротивления утечек конденсаторов C_1 и C_2.

По схеме, показанной на рис. 39,*г*, осуществляют измерение больших сопротивлений, в том числе сопротивлений изоляции конденсаторов. Измеряемое сопротивление подключают параллельно конденсатору известной емкости *C*, который заряжают до некоторого напряжения $U_Б$. Затем размыкают выключатель *Вк* и одновременно запускают секундомер. За некоторый промежуток времени t конденсатор разрядится до напряжения U_1 Однако при этом надо иметь в виду, что конденсатор разряжается не только через

измеряемое сопротивление, но и через собственное сопротивление утечки и через входное сопротивление вольтметра Поэтому в результате вычислений будет получена величина не искомого сопротивления R_x, а параллельного соединения этих трех сопротивлений Для устранения влияния сопротивлений утечек процесс измерения повторяют, но уже при отключенном сопротивлении R_x

Пусть продолжительность разряда будет принята в обоих случаях одинаковой и конденсатор во втором случае разрядится до напряжения U_2 Тогда действительное значение измеряемого сопротивления

$$R_x = \frac{t}{C \ln \frac{U_2}{U_1}}. \qquad (55)$$

Разумеется, поправка необходима лишь при измерении очень больших сопротивлений, в большинстве же случаев влиянием утечек можно пренебречь

Схема на рис 39,*д* предназначена для измерения емкостей при условии, что измеряемая емкость $C_x > 0{,}1 C_н$, где $C_н$ — емкость эталонного конденсатора

Предварительно эталонный конденсатор заряжают до напряжения $U_Б$; при этом заряд на конденсаторе $Q = C_н U_Б$. Затем переключателем *П* батарею отключают, а параллельно конденсатору $C_н$ подключают измеряемую емкость C_x Теперь часть заряда Q перейдет на емкость C_x и вольтметр покажет новое значение напряжения $U = Q/C_x + C_н$ Так как полный заряд в обоих случаях один и тот же, можно написать

$$C_н U_Б = (C_x + C_н) U, \qquad (56)$$

откуда и определяется значение C_x.

Схема на рис 40,*е* предназначена для измерения малых емкостей, когда $C_x < 10\ C_н$ Вначале цепь батареи разомкнута и напряжение на емкости $C_н$ равно нулю После замыкания цепи батареи последовательно соединенные конденсаторы получат одинаковые заряды $Q = \frac{C_x C_н}{C_x + C_н} U_Б$, а напряжение на конденсаторе $C_н$, измеряемое вольтметром, будет $U = \frac{C_x}{C_x + C_н} U_Б$ Отсюда и определяют искомую величину C_x.

Схема на рис 40,*ж* служит для измерения сопротивлении Она подобна схеме обычного омметра, с тои лишь разницей, что очень высокое входное сопротивление вольтметра позволяет применять эталонные сопротивления большой величины и измерять тем самым бо́льшие сопротивления

В сочетании с емкостными, пьезоэлектрическими и подобными им датчиками, а также с датчиками, использующими радиоактивные излучения, вольтметры с высоким входным сопротивлением используются также для измерения самых разнообразных неэлектрических величин.

Литература

Арутюнов В. О., Электрические измерительные приборы, Госэнергоиздат, 1958.

Байда Л. И., Семенкович А. Л., Электронные усилители постоянного тока, Госэнергоиздат, 1953.

Бонч-Бруевич А. М., Применение электронных ламп в экспериментальной физике, Гостехиздат, 1955.

Гальперин Б. С., Непроволочные сопротивления, Госэнергоиздат, 1958.

Заруцкий Ю. Ф., Сеточные токи, расчет и конструирование электрометрических ламп, Сборник материалов по вакуумной технике, вып. XXII, Госэнергоиздат, 1960.

Карандеев К. Б., Методы электрических измерений, Госэнергоиздат, 1958.

Шинтльмейстер И., Электронная лампа как прибор для физических измерений, Гостехиздат, 1949.

Эрглис К. Э., Степаненко И. П., Электронные усилители, Физматгиз, 1961.

Цена 25 коп.